

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Laserové svařování teplotních čidel

Laser Welding of Temperature Sensors

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Vladislav Ochodek

Student:

Jan Kubný

Ostrava 2019

Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Kubný**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2303R002 Strojírenská technologie**
Téma: **Laserové svařování teplotních čidel**
Laser Welding of Temperature Sensors
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte studii současných technologií svařování teplotních čidel.
2. Charakterizujte použitý základní materiál a požadavky na svarový spoj.
3. Navrhněte změnu technologie svařování se zaměřením na laserové svařování.
4. Vyhodnoťte vybrané vlastnosti svarových spojů a proveďte diskusi dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:


ASM. Handbook vol. 6, *Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001.
DAWES, C. T. *Laser welding: a practical guide*. Woodhead Publishing, 1992.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vladislav Ochodek**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019



Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

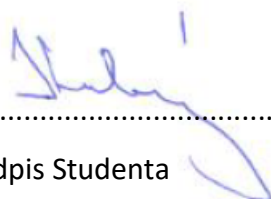


Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V práci jsem použil interní údaje o technických parametrech teplotních sensorů společnosti Continental Automotive Czech Republic, s.r.o.

V Ostravě dne 20.5. 2019



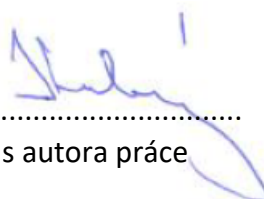
.....

Podpis Studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou*) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou*) práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské*) práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská*) práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20.5. 2019


.....
Podpis autora práce

Jan Kubný

1.Máje 610,

747 27 Koberice

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

KUBNÝ, J. Laserové svařování teplotních čidel: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2019. Vedoucí práce: V. Ochodek.

Bakalářská práce se zabývá laserovým svařování termočlásku a vlivu parametrů, nečistot na tento proces. V úvodu jsou popsány možné technologie pro svařování termočlásku a v závěru je samotný popis termočlásku. V praktické části jsou dva experimenty. V prvním experimentu jsou svařeny vzorky různými parametry a v druhém se zkoumá vliv různých nečistot. Vzorky jsou svařeny na pevnolátkovém infračerveném laseru TrueFiber 1000/PFO 32. Dosažené výsledky mohou být užitečné v budoucích aplikacích.

Klíčová slova: Laserové svařování, termočlánek

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

KUBNÝ, J. Laser welding of temperature sensors: Bachelor Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2019, Thesis head: V. Ochodek.

Bachelor thesis is dealing with Laser welding of thermocouples and their influence of parameters, impurities on this process. The introduction of the thesis describes welding technologies of thermocouples and in the end is description of thermocouples. In practical part there are two experiments. In first one samples are welded with various parameters and in second one influence of impurities is investigated. Samples are welded on solid-state infrared laser TrueFiber 1000/PFO 32. Obtained results can be useful in future applications.

Key words: Laser welding, thermocouple

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Laserové svařování (52).....	2
2.1. Princip laserů	2
2.2. Rozdělení laserů.....	3
2.3. Režimy svařování	6
2.4. Výhody a nevýhody laserového svařování	7
2.5. Svařitelnost vybraných kovů	8
3. Odporové svařování (42)	9
3.1. Princip	9
3.2. Svařovací parametry	10
3.3. Metody odporového svařování	11
3.4. Výhody a nevýhody.....	13
3.5. Svařitelnost vybraných kovů a slitin	14
4. Svařování svazkem elektronů (51)	15
4.1. Princip Svařování svazkem elektronů	15
4.2. Základní části elektronové svářečky	16
4.3. Výhody a nevýhody.....	18
4.4. Svařitelnost vybraných kovů	19
5. Termočlánek	20
5.1. Kompenzace termočlátku	21
5.2. Typy spojů	22
5.3. Druhy termočládků	23
6. Svařované materiály	25
6.1. Nicrosil	25
6.2. Nisil.....	26
7. Svařovací zařízení	27
7.1. TruFiber 1000 a FPO33	27
7.2. TruLaser Cell 3000.....	28
8. Experiment	29
8.1. Návrh 1. experimentu	29
8.2. Výsledky 2. experimentu	31
8.3. Vyhodnocení 1. experimentu	35
8.4. Návrh 2. experimentu	36
8.5. Výsledky 2. experimentu	38

8.6. Mikrotvrdost	45
8.7. Vyhodnocení 2. experimentu	47
9. Závěr	48
Seznam literatury.....	49

Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Název	Jednotka
Cr	chrom	[-]
Rh	rhodium	[-]
Sn	cín	[-]
Ta	tantal	[-]
Nb	niob	[-]
Co	kobalt	[-]
Mg	hořčík	[-]
Si	křemík	[-]
He	helium	[-]
N	dusík	[-]
Al	hliník	[-]
Ag	stříbro	[-]
Au	zlato	[-]
Cu	měď	[-]
Ni	nikl	[-]
Pt	platina	[-]
Fe	železo	[-]
Be	beryllium	[-]
Ti	titan	[-]
Te	tellur	[-]
Mo	molybden	[-]
W	wolfram	[-]
Pd	paládium	[-]
CO ₂	oxid uhličitý	[-]
MgO	oxid hořečnatý	[-]
Ød	průměr drátu	[mm]
R _{p0.2}	smluvní mez kluzu	[MPa]
R _m	mez pevnosti	[MPa]
A	prodloužení	[%]
HV	tvrdost podle Vickerse	[-]
ρ	hustota	[Kg/m ³]

λ	tepelná vodivost	[W/m·K]
T_t	bod tavení	[°C]
T	teplota	[°C]
U_e	elektromotorické napětí	[V]
α	seebeckův koeficient	[V/K]
$T_{\text{měř}}$	teplota měření	[°C]
T_{ref}	referenční teplota	[°C]
f	frekvence	[Hz]
λ	vlnová délka	[m]
I	svařovací proud	[A]
R	elektrický odpor	[Ω]
t	čas	[s]
Q	teplo	[J]
TC	termočlánek	[-]
ns	nevytvořený svar	[-]
too	teplem ovlivněná oblast	[-]
zm	základní materiál	[-]
E	energie	[J]

1. Úvod

Teplotní čidla jsou důležitou součástí automobilů. Toto jednoduché zařízení porovnává teplotu okolního vzduchu s teplotou spalín. Pomocí těchto teplot se určuje správný směšovací poměr paliva a vzduchu, který je důležitý pro snížení škodlivých emisí. Pro lepší stabilitu a přesnost při vysokých teplotách byl vyvinut termočlánek typu N, který má lepší vlastnosti než nejčastěji používaný typ K. Termočlánek se skládá ze dvou slitin – nicrosil a nisol. Tato bakalářská práce bude zaměřena na svarové spoje nicrosilu (růžový drátek).

V teoretické části jsou studovány možné technologie pro svařování termočlánu a v závěru je rozebrán i samotný termočlánek. V experimentální části se budou zkoumat vzorky svařené na vláknovém laseru. Experiment se dělí na dvě části. Cílem první experimentální části je určit vhodnost parametrů pro laserové svařování. V druhé části bude simulace vstupu kontaminace svarových ploch do procesu svařování a byla tak připravenost na možnou situaci ve výrobě. V úvodu experimentální části je popis svařovaných materiálu a strojů kde se bude svařovat. Po svaření těchto vzorků proběhne vizuální kontrola a měření mikroskopem, kde se bude měřit nejmenší průměr svaru. Následně všechny vzorky projdou tahovou zkouškou, kdy se nebude vyhodnocovat pouze dosažená síla, ale také její rozptyl. U druhého experimentu proběhne navíc kontrola mikrotvrdosti a kontrola lomů svarových ploch.

Bakalářská práce bude probíhat ve firmě Automotive Continental Ostrava. Tato firma vyrábí součástky do automobilů jako jsou pneumatiky, brzdné systémy, vstřikovací systémy, různé sensory apod. V Ostravě probíhá vývoj teplotních čidel, na kterých bude mít tato bakalářská práce podíl.

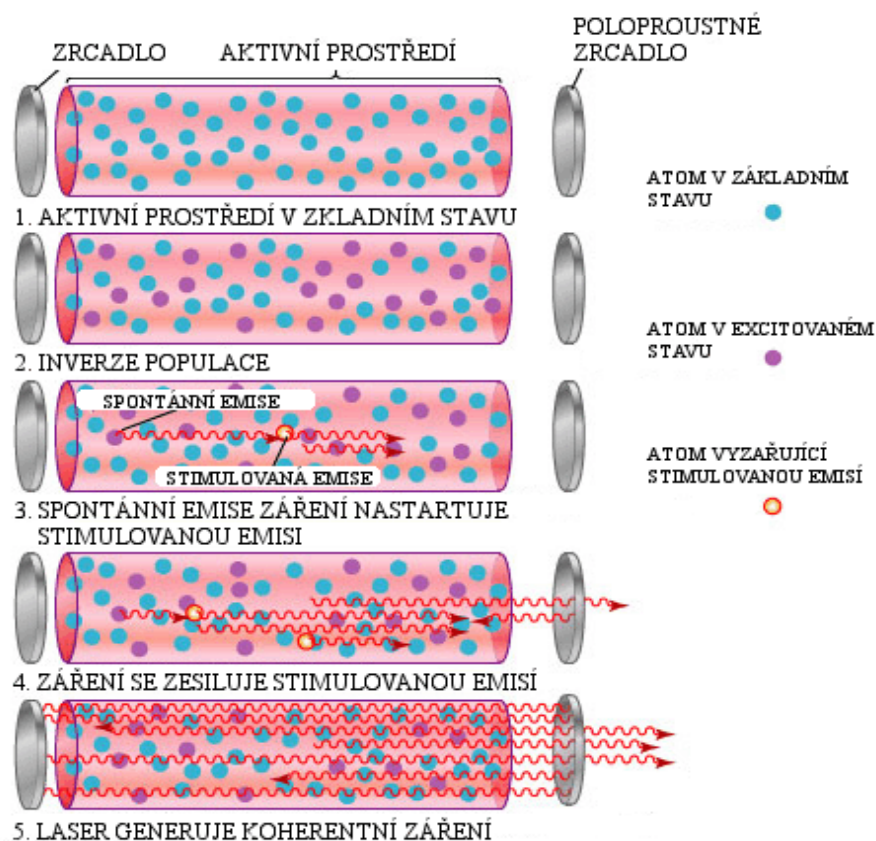
Výsledky experimentů ukážou vhodnost parametrů pro laserové svařování a vliv nečistot na tento proces. Tyto výsledky tak můžou být užitečné při budoucích aplikacích této technologie.

2. Laserové svařování (52)

I když tato technologie je nám známa více než 50 let, tak přesto tato metoda není plně prozkoumaná a pokračuje její vývoj. Díky automobilovému průmyslu není tato technologie již výjimkou. Dále tato metoda je využívána v oblasti elektrotechniky a výrobě medicinských komponent. První laserový paprsek byl vyvinut Theodorem Maimanem v roce 1960. V roce 1964 C. Kumar N. Patel první plynový CO₂ laser, který byl vhodný pro svařování tak i pro řezání. První významné využití této technologie bylo svařování ventilů v roce 1976 firmou General Motors. Poslední desetiletí byly vyvinuty kombinace metody obloukového svařování a laseru [1].

2.1. Princip laserů

Light amplification by stimulated emission of radiation – ve zkratce LASER. Volně se dá přeložit jako světlo které je zesílené pomocí stimulace radiací. Základem Laseru jsou tři prvky. První z nich je buzení, to je externí zdroj potřebný pro dodání energie atomům. Druhým prvkem je aktivní médium. To je soubor atomů, které mohou dosáhnout vyšší energetické hladiny. Aktivní prostředí je umístěno v rezonátoru. Což je třetí prvek soustavy. Ten je tvořen dvěma zrcadly. Jedním zcela odrazivým a druhým polopropustným [2]. Začátkem procesu je buzení, to může být vyvoláno elektricky, světelným výbojem apod. Tím nastává tak tzv. inverze populace, to znamená že atom přeskočí na vyšší energetickou hladinu. Atom se snaží mít co nejmenší energii a snaží dostat do svoji základní energetické hladiny. To se nazývá spontánní emise. Při této spontánní emisi atom vyzáří foton. Pokud tento foton potká atom ve vyšší energetické hladině, tak ho donutí spadnout na základní hladinu mnohem dříve, než by přešel na ní samostatně. Výsledkem jsou pak dva stejné fotony. Tyto fotony dále stimulují další atomy a vzniká řetězová reakce. Vznikají tak další fotony o stejných vlastnostech. Fotony se následně odrážejí v rezonátoru se zrcadly a pokračují ve stimulované emisi. Po překročení určité meze polopropustné zrcadlo propustí část fotonů a vzniká tak laserový paprsek [3].



Obrázek 2.1. – Princip vzniku laserového paprsku [8]

2.2. Rozdělení laserů

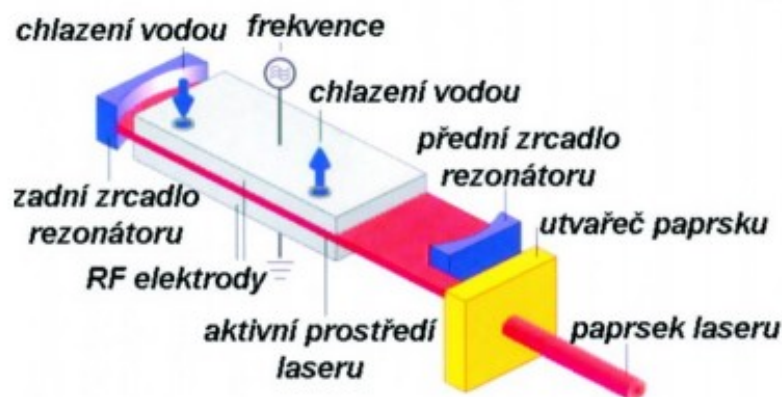
Lasery se dají dělit podle různých věcí jako např. vlnové délky, typu buzení, režimu vlnové délky atd. Hlavním faktorem, podle kterého lasery dělíme je aktivní prostředí, ve kterém laser vzniká. Na konstrukci laserů lze použít látky všech skupenství (plyny, kapaliny, tuhé látky). Na další straně jsou pak popsány nejčastěji používané typy.

- Aktivní prostředí:
 - pevnolátkové
 - polovodičové
 - plynové
 - kapalinové
 - plazmatické
- Vlnové délky:
 - infračervené
 - ultrafialové
 - rentgenové

- Typ buzení:
 - opticky
 - elektrickým výbojem
 - elektronovým svazkem
 - chemicky
- Délka generace impulsu:
 - Impulsní
 - kontinuální

Plynové lasery – CO₂ laser

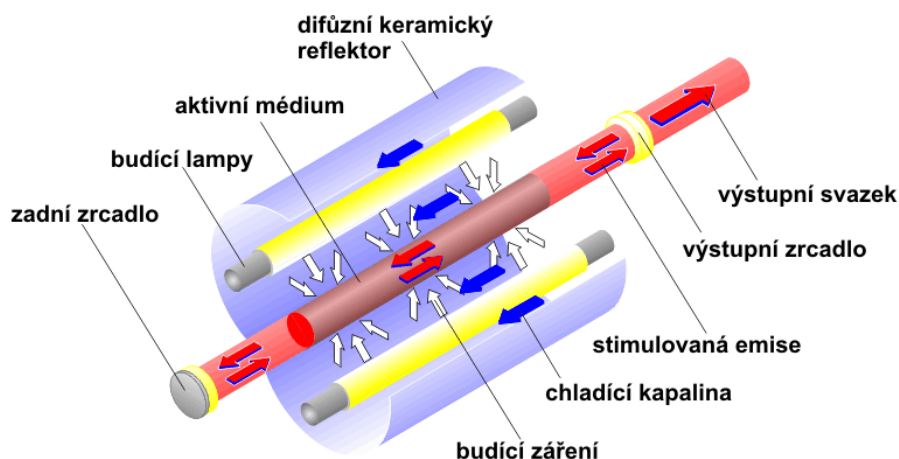
Aktivním prostředím je zde tvořeno plynem nebo směsí plynů. Nejčastější plynový laser je CO₂ laser. Aktivní prostředí tvoří CO₂ smíchané s dusíkem a héliem (He + N₂ + CO₂), jejichž poměry záleží na použití. Buzení je uskutečněno pomocí elektrického výboje nebo radio-frekvenčně. CO₂ lasery mohou pracovat v kontinuálním tak i v mnoha pulzních režimech, kdy frekvence pulzu může dosahovat až 10 kHz [4]. Vlnová délka je 10,6 μm, což je nevýhodou oproti laserům s vlnovou délkou pod 1 μm, protože laserové záření CO₂ laseru nelze vést optickým vláknem. Pro jeho vedení se musí používat optická zrcadla [5]. Plynové lasery mohou dosahovat vysokých výkonů až 45kW [4]. Jelikož rychlost svařování je přímo úměrná výkonu, tak CO₂ lasery jsou schopny svařovat velkou rychlostí. Díky vyššího výkonu, CO₂ lasery mohou řezat plechy tloušťky až 26 mm. Jeho výhodou je velmi malá rozbíhavost paprsku. Nevýhodou však bývá složitost chlazení, které je nezbytné. Problém také vzniká při svařování mědi, hliníku, zlata, stříbra a slitin hořčíku, kdy se vysoký podíl paprsku odráží. Je nutné tak použít jiný typ laseru [5].



Obrázek 2.2. - Konstrukce CO₂ laseru [6]

Pevnolátkové lasery – Nd:YAG laser

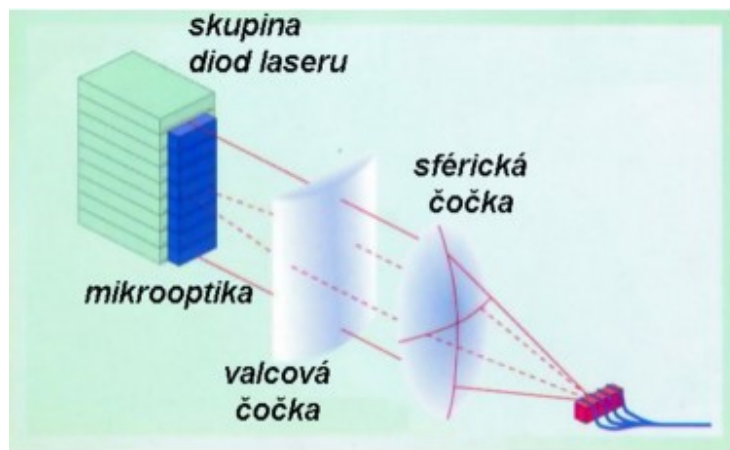
U pevnolátkových laserů je aktivním prostředím homogenní krystal nebo skleněné materiály s příměsí cizorodé látky. Energie buzení je poskytována opticky, pomocí výboji světla lampy nebo laserovými diodami. Nd:YAG je nejpoužívanější typ pevnolátkového laseru. Aktivním materiálem je izotropní krystal Yttrium aluminium granát dopovaný ionty neodymu. Krystal je obvykle ve tvaru tyče a je leštěný a lapovaný. Při procesu musí být krystal chlazený. Dosahuje výkonu až 4,5kW a vlnové délky 1,06 μm a může pracovat v kontinuálním i pulsním režimu, kdy frekvence je většinou pod 200 Hz [5]. Díky jeho krátké vlnové délce je možnost vést laserový paprsek optickým kabelem, což je značnou výhodou oproti CO₂ laseru. Tento typ laseru se hodí i pro těžko svařitelné materiály jako titan, tantal, zirkonium, inconel. Nevýhodou je, že kvůli malému výkonu může být tento laser použitý jen pro tloušťky do 6 mm [4].



Obrázek 2.3. – Konstrukce Nd:YAG laseru [6]

Polovodičové lasery

Známe často jako diodové lasery. Tyto typy lasery jsou menší než většina laserů a jsou velice efektivní. Poskládáním více diod vedle sebe je možnost výkonu několik kW. Vlnová délka je kratší než u CO₂ a Nd:YAG, pohybuje se kolem 800-900 nm. Díky tomu je možné vést laserový paprsek pomocí optického kabelu. Proces buzení je u polovodičových laserů prováděn pomocí elektrického proudu. Diodové lasery se častou používají jako zdroj buzení pro další typy laserů. Výhodou je nižší investiční i provozní náklady a dlouhá životnost. Nevýhodou je rozbíhavost paprsku, tím pádem není moc vhodný pro svařování kontinuálním režimem a řezání. Hodí se pro pájení a svařování plastů [4].



Obrázek 2.4. - Konstrukce polovodičového laseru [6]

2.3. Režimy svařování

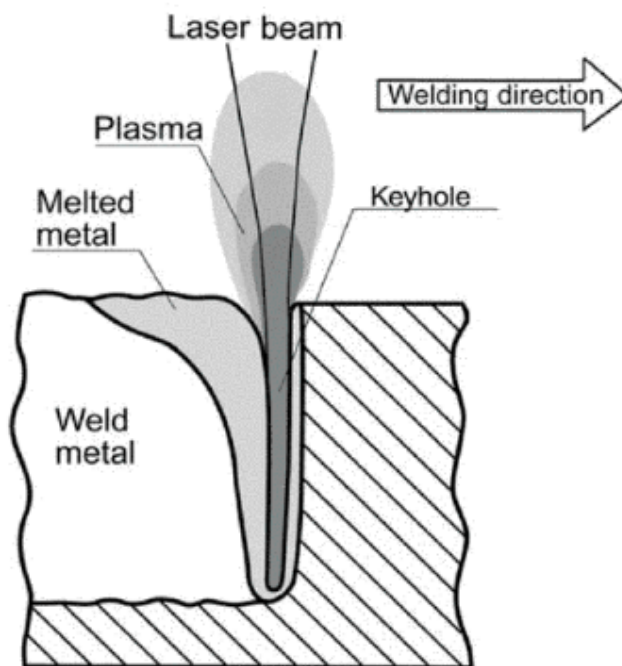
Pulzní svařování – vedením tepla

Při svařování vedením tepla se materiál taví absorpcí. Svarová lázeň mezi jednotlivými pulzy částečně ztuhne. Svarová housenka je pak tvořena za sebou jdoucích a vzájemně se překrývajících body. Tato metoda umožňuje svařovat jen malé hloubky [7]. Výhodou pak je rychlost svařování, kdy může být vyšší pro některé aplikace a spojování obtížně svařitelných materiálů [8].

Kontinuální svařování – metoda tzv. klíčové dírky

Tato možnost je realizována vysokou hustotou výkonu na dopadovou plochu. Materiál se začne tavit i vařit. Vznikne tak klíčová dírka, kapilára naplněná ionizovanými výpary kovů o vysoké teplotě [7]. Stěny kapiláry pak tvoří roztavený kov a teplo je vedeno dál do tuhého materiálu. Tlak plynů vystupující z kapiláry zároveň brání uzavření kapiláry [8]. Když se pak laserový paprsek se pak pohybuje ve směru svařování, tak se roztavený kov za ním vlivem povrchového napětí uzavře kapiláru. Vzniká svar. Tenhle proces nám umožňuje pronikat hluboko do materiálu. Hloubka průvaru může být až 50 mm [7].

Tavná lázeň je v obou případech chráněna ochrannou atmosférou před nežádoucími účinky okolí. Použité plyny jsou nejčastěji argon, helium nebo oxid uhličitý. Tyto ochranné plyny taky zvyšují a stabilizují absorpci plazmatu. Energie laserového paprsku po vzniku plazmatu může skoro zcela vniknout do materiálu a zvýšit tak efekt provaření [8].



Obrázek 2.5. – Princip klíčové dírky [4]

laser beam – laserový paprsek; welding direction – směr svařování; plasma – plazma; keyhole – klíčová dírka; melted metal – roztavený kov; weld metal – svařený kov

2.4. Výhody a nevýhody laserového svařování

Výhody laserového svařování:

- Úzký svar s malou tepelně ovlivněnou oblastí
- Vysoké svařovací rychlosti, vysoká produktivita
- Kvalita svaru
- Není potřeba přídavný materiál
- Možnost svařovat těžko svařitelné materiály
- Automatizace procesu
- Možnost svařování nekovových materiálů

Nevýhody laserového svařování:

- Vysoké investiční náklady
- Potřeba přesného ustanovení svarových ploch
- Potřeba ventilace na odvod škodlivých plynů

2.5. Svařitelnost vybraných kovů

	Al	Ag	Au	Cu	Pd	Ni	Pt	Fe	Be	Ti	Cr	Mo	Te	W
Al	1													
Ag	3	3												
Au	3	1	1											
Cu	3	3	1	1										
Pd	4	1	1	1	4									
Ni	3	4	1	1	1	1								
Pt	4	3	1	1	1	1	1							
Fe	4	4	3	3	2	2	2	1						
Be	4	4	3	3	3	3	4	3	4					
Ti	3	3	3	3	3	3	3	3	4	1				
Cr	4	4	3	4	2	2	1	1	4	2	4			
Mo	4	4	4	4	4	3	1	2	4	1	1	4		
Te	4	4	4	4	2	2	3	3	4	1	4	1	4	
W	4	4	4	4	3	3	2	3	4	3	1	1	1	1

Tabulka 2.1. – Svařitelnost vybraných kovů [8]

- 1 – velmi dobrá svařitelnost
- 2 – dobrá svařitelnost
- 3 – uspokojivá svařitelnost
- 4 – špatná svařitelnost/nesvařitelné

3. Odporové svařování (42)

Odporové svařování patří mezi jedny z nejstarších metod. Již v roce 1886 Elihu Thomson sestavil první svařovací transformátor. Tento svařovací přístroj se používal k svařování natupo. V následujících letech pokračoval ve vývoji. Vznikly tak další typy odporového svařování jako je bodové, švové, výstupkové a stykové. V roce 1964 začala automobilka General Motors jako první používat roboty pro bodové svařování. Díky jeho produktivitě a jednoduchosti se tato metoda rozšířila do různých průmyslových odvětví. Největší zastoupení má v automobilovém průmyslu, kdy auto obsahuje tisíce těchto spojů [4].

3.1. Princip

Odporové svařování zahrnuje koordinovanou aplikaci svařovacího proudu a tlaku o dostatečné hodnotě po určitou dobu. Svařované součásti jsou stlačovány k sobě pomocí měděných elektrod. Síla je aplikovaná před samotným procesem a její uvolnění dojde na konci procesu svařování. Teplo vzniká v důsledku odporu proti průchodu elektrického proudu skrz svařované části. To má za příčinu vzniku lokálního natavení svařovaných součástí a následného vytvoření svaru. Množství nataveného materiálu je závislé na množství tepla, aplikované síly a času [5]. Teplo se dá vyjádřit pomocí následujícího vzorce:

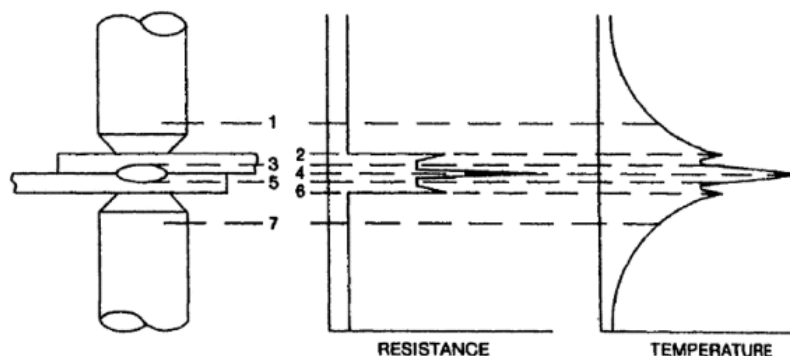
$$Q = I^2 \cdot R \cdot t [J]$$

Kde: Q = Dodané teplo

I = Svařovací proud

R = Celkový elektrický odpor

t = Čas svařování



Obrázek 3.1. – Graf elektrického odporu a teploty při odporovém svařování [3]

resistance – elektrický odpor; *temperature* – teplota; 1,3,5,7 – odpor materiálu; 2,4,6 – přechodový odpor

3.2. Svařovací parametry

Svařovací proud

Svařovací proud je nejvýznamnější parametr ze všech. Jak můžeme vidět z rovnice tepla, svařovací proud je kvadratický. Proto má svařovací proud největší podíl na generaci tepla a musí být pečlivě nastavený. Svařovací proud může být střídavý i stejnosměrný. Se zvyšující se hodnotou svařovacího proudu roste velikost svaru. Roste taky jeho pevnost, vzhledem k tomu, že pevnost závisí na rozměrech [9]. U vysokých svařovacích proudů má svar malou pevnost, vznikají trhliny a další různé vady. To nemá to ani dobrý vliv na elektrody, které se rychleji opotřebovávají. Na druhou stranu příliš nízký proud nevytvoří žádný svar nebo nedostatečně velký svar a pevnost svaru bude taky malá [4].

Svařovací čas

Je to čas, během kterého prochází svařovací proud skrz svařované součásti. Je měřen v cyklech. Jeden cyklus se rovná $1/50$ sekundy. Důvodem je frekvence střídavého proudu, která je v Evropě 50 Hz [4]. Z rovnice vyplývá, že svařovací čas je přímo úměrný generaci tepla. Musí se však počítat s určitými ztrátami. Během celého procesu se mění celkový a přechodový odpor. Přechodový odpor je ze začátku vyšší a postupem času klesá, proto se nejvíce tepla generuje na stykových plochách [9]. Čas musí mít dostatečnou délku, aby se teplo dostalo do okolního materiálu a vytvořil se tak požadovaný svar. Pokud je čas příliš dlouhý, v bodě mezi svařovanými součástmi kov značně překročí bod tavení a vnitřní tlak může vytlačit kov pryč. Ve svarech by se také tvořili různé vady, kvůli požadovanému vysokému svařovacímu proudu [5].

Přítlačná síla

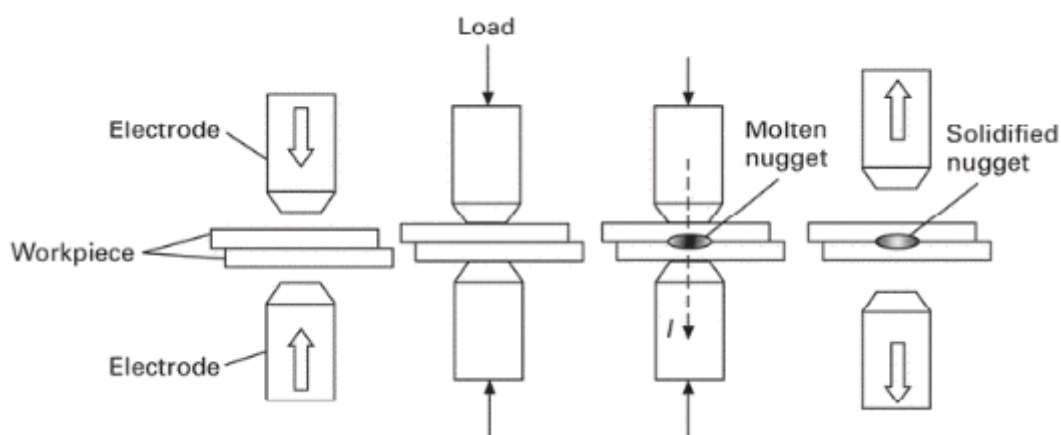
Je to síla, kterou elektrody stlačují svařované materiály k sobě a má také velký vliv na přechodový odpor. Elektrický proud neprochází mezi dvěma povrchy, tak efektivně jako jedním tělesem. Má tendenci procházet místem nejmenšího odporu. Proto se mezi dvěma tělesy vytváří tzv. přechodový odpor. To je dáno neperfektním povrchem. Čím více je povrch drsnější, tím je přechodový odpor větší a tím se začne generovat více tepla. S použitím přítlačné síly je tak možnost dva povrchy dostat většího kontaktu. Přechodový odpor se v daném místě sníží a začne ním vést elektrický proud. Pomocí přítlačné síly tak lokalizujeme místo pro vytvoření svaru. Je důležité kontrolovat velikost této síly [10]. Pokud bude síla příliš malá, bude velký přechodový odpor velký. To vede k tvorbě svarů s malou

pevností. Při příliš velké stlačovací síle bude pevnost svarů taky malá z důvodu nedostatečně velkých svarů, doprovázeno velkým opotřebením elektrod. Velikost této síly bude záviset na tloušťce svařovaných součástí [4].

3.3. Metody odporového svařování

Bodové svařování

Metoda bodového svařování je ze všech nejznámější a zároveň nejvíce používaná. Značné uplatnění má tato metoda v Automotive. Je používána pro svařování dvou překrývajících se součástí. Samotný proces začíná stlačením těchto součástí pomocí dvou elektrod v určitém bodě. Mezi elektrody a součástmi začne proudit elektrický proud. V místě přitlačení vzniká menší odpor než ve zbylých částech. To znamená, že proud se koncentruje do těchto nerovnoměrností. Výsledkem je větší zahřívání těchto stlačovaných bodů. Proces končí zchlazením svaru [4].

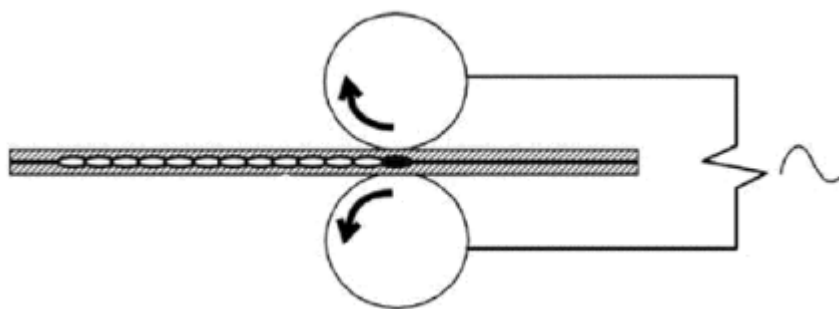


Obrázek 3.2. – Průběh bodového svařování [9]

electrode – elektroda; Workpiece – svařované součásti; load – zatížení; molten nugget – roztavený kov; solidified nugget – ztuhlý svar

Švové svařování

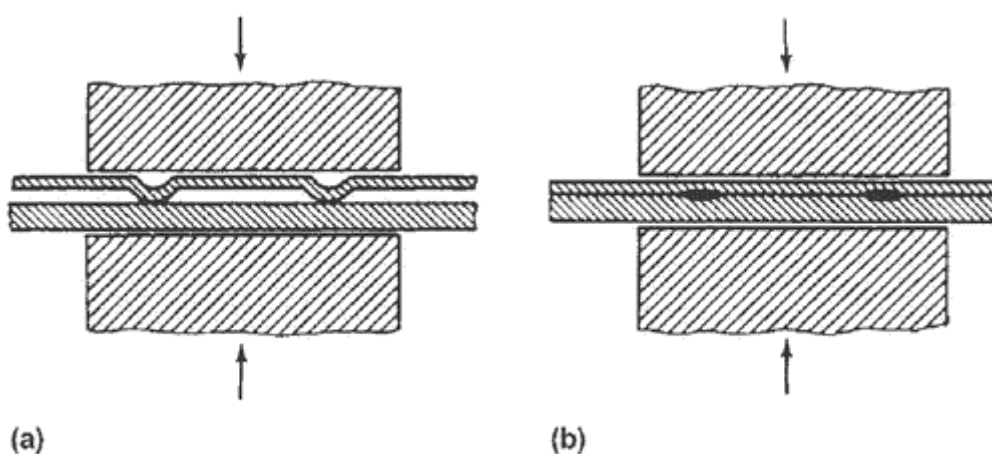
Švové svařování funguje na stejném principu jako svařování bodové. Hlavní rozdíl je ve tvaru elektrod. Ty jsou většinou ve tvaru kotoučů, které rotují a konstantně stlačují svařované součásti. Svařovací proud pulsuje v určitých intervalech. Vytváří se kontinuální svar, který se skládá z jednotlivých překrývajících se svarů. Přítlačná síla se tak nemusí mezi každým svarem uvolnit. Proto tato metoda je efektivnější než bodové svařování [4].



Obrázek 3.3. – Princip švového svařování [4]

Výstupkové svařování

U této metody jsou místa, kde vznikne svar, předem určeny vytvořenými „výstupky“ nebo tvarem jedné ze dvou svařovaných součástí. Tyto výstupky pak slouží jako koncentrátoři pro přechod proudu a vzniku tepla. V první části procesu se součásti stlačují proti sobě, deformují se a vytváří tlakový spoj. Poté se aplikuje proud. V místě dotyku součástí se materiál začne zahřívat a dostává se do plastického stavu. Vzniká svar. Přítlačná síla se uvolní až po určité době, až svar zchladne. Metoda je vhodná pro svaření plechů nebo tyčí s plechem. Svařování drátu je taky možné, kdy se dráty překříží a v bodě překřížení dochází k natavení [12].



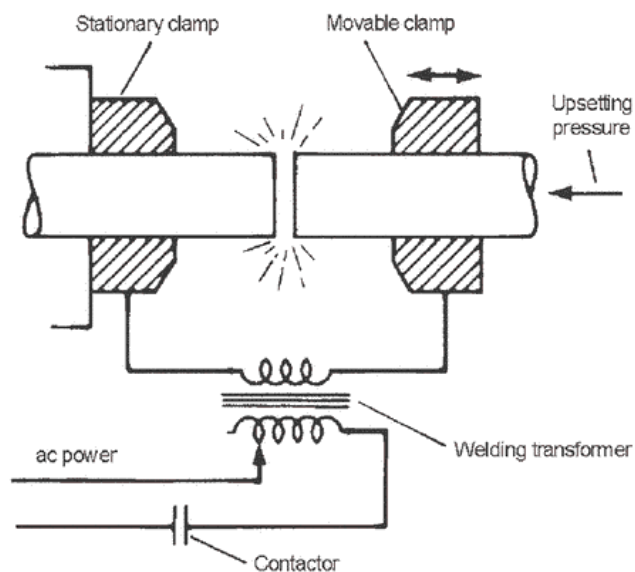
Obrázek 3.4. – Princip výstupkového svařování [12]
a) před procesem svařování b) vytvoření svarů po aplikování síly

Svařování natupo

Metoda svařování natupo je využívána pro spojení drátů, trubek, tyčí menších průměru. Součásti jsou upnuty v čelistech a jsou stlačovány k sobě. Teplo začne vznikat mezi dvěma přiléhajícími plochami, poté co je aplikován svařovací proud. Materiál se dostane do plastického stavu a díky přítlačné síle vzniká svar [4].

Stykové svařování

Tato metoda se používá pro svařování větších součástí jako jsou například kolejnice. Celý proces začíná předehřátím obou součástí. To je dosaženo pomocí spojování a následného odtržení od sebe, kdy součástmi probíhá elektrický proud. Tohle probíhá, dokud se nedosáhne potřebné teploty. V následujícím kroku jsou součásti pomalu stlačeny. To má za příčinu prudkého natavení součástí. Roztavené kovy se spojí a proces pokračuje aplikací kovacího tlaku. Různé nečistoty a oxidy jsou tak vytlačeny ze spoje [4].



Obrázek 3.5. – Princip stykového svařování [12]

stationary clamp – nepohyblivý svěrák; movable clamp – pohyblivý svěrák; upsetting pressure – přitlačný tlak; welding transformer – svařovací transformátor; ac power – zdroj střídavého proudu; contactor – kondenzátor

3.4. Výhody a nevýhody

Výhody odporového svařování:

- Automatizace procesu
- Velká produktivita
- Krátká doba svařování
- Není potřeba přídavný materiál
- Vzniká minimální deformace a napětí
- Možnost svařování tenkých spojů (až 0.1 mm)

Nevýhody odporového svařování:

- Potřeba přístupu ke spoji z obou stran
- Větší investiční náklady
- Malá účinnost pro vysoce vodivé materiály
- Spoje mají nízkou pevnost v tahu
- Svary hůře odolávají dynamickému namáhání

3.5. Svařitelnost vybraných kovů a slitin

	Hliník	Nerezová ocel	Mosaz	Měď	Galvanizovaná ocel	Ocel	Olovo	Monel	Nikl	Niklochromové slitiny	Pocínovaná ocel	Zinek	Fosforbronz	Slitina alpaka
Hliník	2													
Nerezová ocel	6	1												
Mosaz	4	5	3											
Měď	5	5	4	6										
Galvanizovaná ocel	3	2	4	5	2									
Ocel	4	1	4	5	2	1								
Olovo	5	6	6	5	4	5	3							
Monel	4	3	3	4	3	3	5	1						
Nikl	4	3	3	4	3	3	5	2	1					
Niklochromové slitiny	4	3	3	4	3	3	5	2	2	1				
Pocínovaná ocel	3	2	4	5	2	2	6	3	3	3	3			
Zinek	3	5	5	5	6	6	3	6	6	6	3	3		
Fosforbronz	3	4	3	3	3	3	5	3	3	4	4	4	2	
Slitina alpaka	6	4	3	3	4	4	5	2	2	2	4	6	2	1

Tabulka 3.1. – Svařitelnost vybraných kovů a slitin [12]

1 – excelentní svařitelnost

2 – dobrá svařitelnost

3 – uspokojivá svařitelnost

4 – špatná svařitelnost

5 – velmi špatná svařitelnost

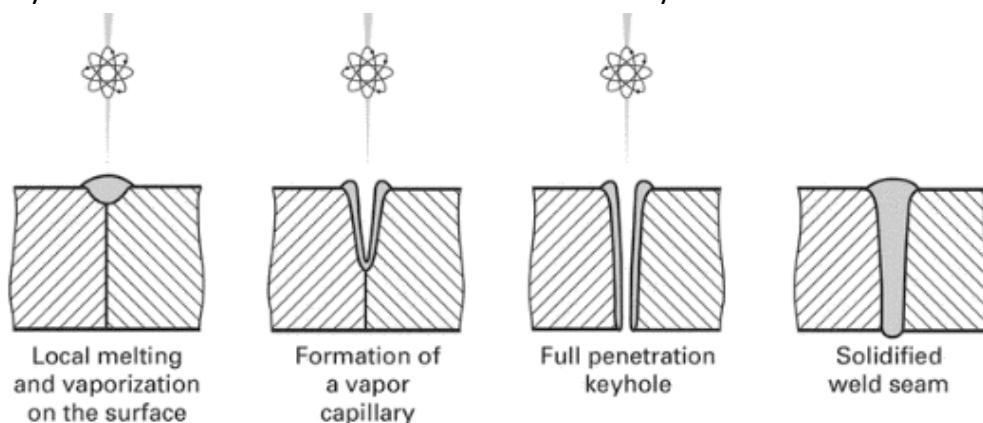
6 – nepoužitelný spoj

4. Svařování svazkem elektronů (51)

Tato metoda byla vyvinuta německým fyzikem Karl-Heinzem Steigerwaldem v roce 1958, který prováděl experimenty na transmisním elektronovém mikroskopu. Při jednom experimentu při zvýšeném výkonu vzorek zmizel. Později zjistil, že nastavováním výkonu vzorek se roztaví a zase ztuhne. Byly ta podány základy pro svařování svazkem elektronů. Ze začátku se elektronové svářečky používaly pouze v laboratořích. V 70. letech 20. století díky velké kvalitě svaru se metoda začala užívat i v průmyslu. Především byla využívána v kosmonautice a jaderném průmyslu. V dnešní době je metoda rozšířena ve všech oblastech strojírenství. Pro její ekonomickou náročnost se převážně využívá v kosmickém průmyslu, energetice a u některých aplikací v automobilovém průmyslu [11].

4.1. Princip Svařování svazkem elektronů

Svařování svazkem elektronů je proces spojení materiálu s vysokou hustotou energie. Elektrony jsou základní částice hmoty o malé hmotnosti a záporném náboji. Tyto elektrony jsou zrychleny v elektronové pistoli na 30 % až 70 % rychlosti světla. Teplo pro svařování je získáno pomocí „bombardování“ materiálu paprskem elektronů. Kinetická energie elektronů se tak mění na tepelnou [5]. Z důvodu velké hustoty energie se materiál začne vařit. Jakmile začne tavení a odpařování, nastane proces klíčové dírky. Poté co pára vznikne, rozšiřuje se a uvolňuje se pryč z povrchu. To vyvolává reakční sílu, která tlačí roztavený kov do stran a směrem dolů. Výsledkem je rychlé šíření dutiny vyplněné párou a obklopenou roztaveným kovem skrz materiál. Po zaniknutí klíčové dírky a ochlazení kovů vzniká svar [3].



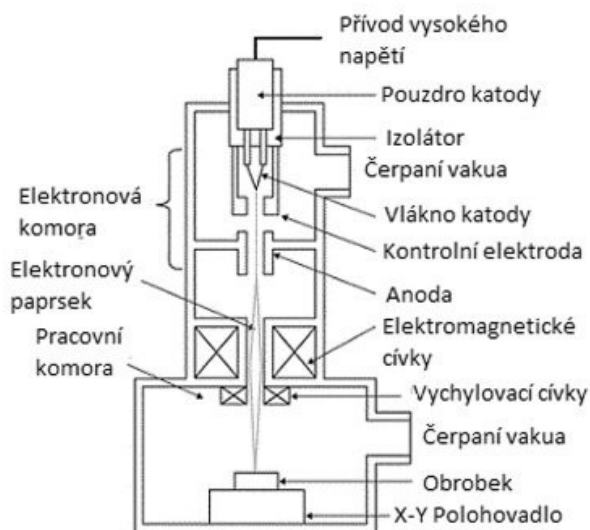
Obrázek 4.1. – Princip tvoření klíčové dírky [9]

local melting and vaporization on the surface – lokální tavení a vypařování na povrchu; formation of vapor capillary – formace párové kapiláry; full penetration keyhole – úplný průnik klíčové dírky; solidified weld seam – ztuhlý svarový spoj

4.2. Základní části elektronové svářečky

Elektronová pistole

Elektronový parsek vzniká v tzv. elektronové pistoli, která obsahuje 3 základní části. Kovovou katodu, pomocnou elektrodu a anodu. Elektrony jsou získány z katody pomocí jejího zahřátí na potřebnou teplotu. S vyšší teplotou roste počet vyzářených elektronů, proto se pro katodu volí vysoko tavitelné materiály jako je wolfram a tantal. Katoda se během procesu opotřebovává, proto je nutné ji navrhnout tak, aby se dala jednoduše vyměnit [9]. Vyzářené elektrony získané zahřátím jsou odpuzovány k anodě. To je dosaženo pomocí rozdílu potenciálu anody a katody. Anoda je nabitá na kladný potencionál. Katoda a pomocná elektroda mají záporný potencionál. Hlavní funkce pomocné elektrody je vytváření geometrii elektrostatického pole. To zrychluje a usměrňuje paprsek elektronů. Celý tento systém je umístěn ve vakuu. I když můžeme svařovat ve vzduchu, tvorba paprsku musí probíhat ve vakuu [5].



Obrázek 4.2 – Schéma elektronové svářečky [13]

Elektromagnetická cívka

Když svazek elektronů začne vycházet z elektronového děla, tak se začne různě rozptylovat. Pro zabránění rozptýlení paprsku se používá elektromagnetická cívka. Protože elektrony jsou nabitě částice, můžeme je řídit pomocí elektromagnetického pole. To vzniká průchodem elektrického proudu přes cívku [14]. Velikost elektromagnetického pole závisí na velikosti elektrického proudu. Změnou proudu může být paprsek zaměřen na požadované místo [5].

Vychylovací cívky

Vychylovací cívky, které je umístěny pod elektromagnetickou cívkou, slouží k přesunu paprsku na požadované místo. Cívky jsou schopny vytvořit i různé geometrické obrazce jako jsou kružnice, čtverce, obdélník, hyperbola atd. Stejně jako u elektromagnetické cívky, jsou elektrony usměřňovány elektromagnetickým polem [5]. U moderních zařízení je možnost přehřevu a dohřevu svaru, a tak minimalizovat praskání svaru [14].

Pracovní komora

Jsou 3 základní typy komor. Jejich rozdělení se odvíjí od tlaku atmosféry, ve které svařování probíhá. Proces probíhající pod hodnotou tlaku 0,13 Pa (10^{-3} torr) je označován jako vysoké vakuum. Střední nebo také částečné vakuum má rozsah 0,13 Pa – $3,3 \cdot 10^3$ Pa (10^{-3} torr – 25 torr). U vyšších hodnot se jedná o bezvakuovou komoru. Díky minimálnímu obsahu molekul plynu u vysokého vakua dochází k minimálnímu rozptylu paprsku. Svary jsou úzké a mohou pronikat do velkých hloubek. Svar při svařování ve vysokém vakuu je méně vystavený kontaminaci dusíku a kyslíku, proto se hodí pro svařování vysoce reaktivních materiálů. Velikost produkce ve vysokém vakuu není vysoká. Vytvoření vysokého vakua je časově náročné. To je hlavní důvod proč se tento způsob hodí pro málo sériovou výrobu [5]. Tento způsob je vhodný pro velice přesné aplikace v průmyslových odvětvích jako je energetika, elektronika, letecký a kosmický průmysl [15]. Z důvodu zvětšení produktivity se nedosahuje nízkých tlaků v komoře. Střední vakuum lze dosáhnout během několika sekund. Proto se hodí pro větší produkce. Větší koncentrace vzduchu způsobuje větší rozptyl paprsku a snižuje se tak hustota energie. Výsledkem je že svary jsou mírně širší než u vysokého vakua [10]. Poslední typ je komora bez vakua. Výhody svařování bez vakua jsou, že nejsme limitováni velikostí komory a odstraněný čas na vytvoření vakua. Zvětšením obsahu vzduchu při svařování má negativní vliv na samotný proces. Poměr hloubky k šířce svaru je významně menší než u svařování s atmosférou a nejsme schopni dosáhnout hlubokých průvarů [5].



Obrázek 4.3. – Vakuová komora pro elektronové svařování [16]

4.3. Výhody a nevýhody

Výhody svařování svazkem elektronů:

- Hluboce pronikající úzké svary
- Minimálně teplem ovlivněná oblast
- Není potřeba přídavný materiál
- Kvalita svaru
- Díky vakua minimální kontaminace kovu kyslíkem a dusíkem
- Tvorba různých tvarových spojů

Nevýhody svařování svazkem elektronů:

- Ekonomicky nákladné
- Potřeba dobře připravených, těsně ustavených spojů
- Potřeba vakua pro minimalizaci rozptylu paprsku
- Nutná ochrana proti radiačnímu záření

4.4. Svařitelnost vybraných kovů

	Ag	Al	Au	Be	Co	Cu	Fe	Mg	Mo	Nb	Ni	Pt	Rh	Sn	Ta	Ti	W
Al	2																
Au	1	5															
Be	5	2	5														
Co	3	5	2	5													
Cu	2	2	1	5	2												
Fe	3	5	2	5	2	2											
Mg	5	2	5	5	5	5	3										
Mo	3	5	2	5	5	3	2	3									
Nb	4	5	4	5	5	2	5	4	1								
Ni	2	5	1	5	1	1	2	5	5	5							
Pt	1	5	1	5	1	1	1	5	2	5	1						
Rh	3	4	4	5	1	3	5	4	5	5	3	2					
Sn	2	2	5	3	5	2	5	5	3	5	5	5	3				
Ta	5	5	4	5	5	3	5	4	1	1	5	5	5	5			
Ti	2	5	5	5	5	5	5	3	1	1	5	5	5	5	1		
W	3	5	4	5	5	3	5	3	1	1	5	1	5	3	1	2	
Zr	5	5	5	5	5	5	5	3	5	1	5	5	5	5	2	1	5

Tabulka 4.1. – Svařitelnost vybraných kovů [5]

1 – velice vhodná kombinace
 2 – pravděpodobně přijatelné
 3 – použít s opatrností

4 – použít s zvýšenou opatrností
 5 – nevhodná kombinace

5. Termočlánek

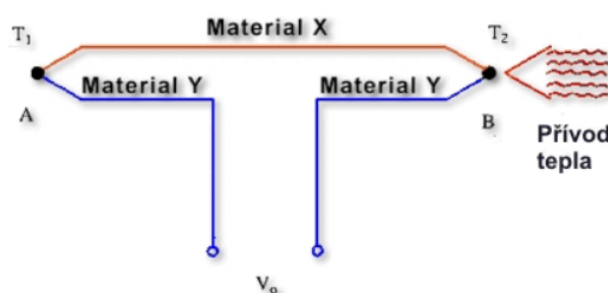
Je to jednoduché, levné, odolné zařízení pro měření teplot. Termočláanky jsou používány ve velkém množství odvětví. Od automobilového průmyslu po medicínu až po aplikaci v kuchyňském vybavení. Fungují na principu termoelektrického jevu (Seebeckův jev). Tento jev se týká přeměny tepelné energie na energii elektrickou. Jev využívá schopnost materiálu vytvořit termoelektrické napětí, pokud je obvod tvořen dvěma různými vodiči. Ramena vodičů jsou na konci spojena a jsou v rozdílných teplotách. Napětí je přímo úměrné rozdílu teplot obou konců spojů [17]. Toto termoelektrické napětí je možno vyjádřit pomocí rovnice: $U_e = \alpha \cdot (T_{m\ddot{e}ř} - T_{ref})$ [mV]

Kde: U_e = elektromotorické napětí

α = Seebeckův koeficient

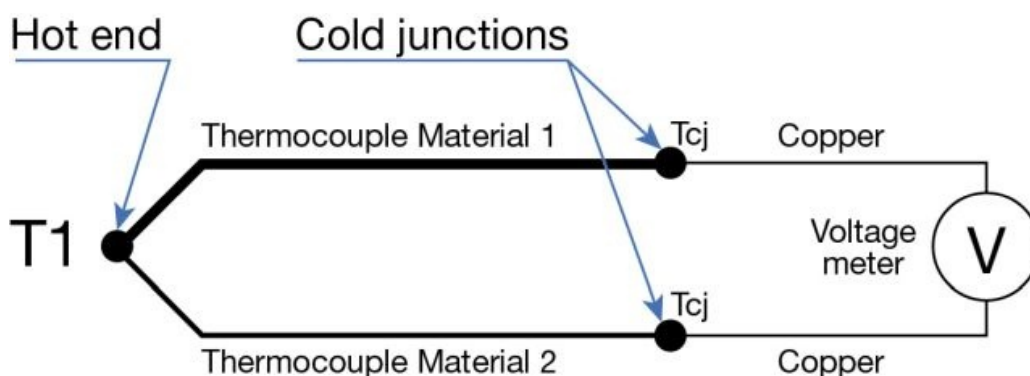
T_{ref} = teplota srovnávaného spoje

$T_{m\ddot{e}ř}$ = teplota měřeného spoje



Obrázek 5.1. - princip Seebeckova jevu [18]

Termočlánek neměří přímo teplotu. Využívá vyprodukované elektrické napětí, které je použito k určení hodnoty teploty. Termočlánek obsahuje dva dráty z rozdílných materiálů. Tyto dva dráty jsou svařeny dohromady a jejich spoj je označován jako "hot end" nebo měřený spoj. Dráty na druhém konci jsou spojeny s měřícím systémem. Dráty měřicího systému jsou ze stejného materiálu, obvykle z mědi. Spoj mezi nimi se nazývá "cold end" nebo referenční spoj. Termočlánek měří napětí mezi těmito dvěma spoji. Vyprodukované elektrické napětí se liší v závislosti na materiálu termočláanky [19].

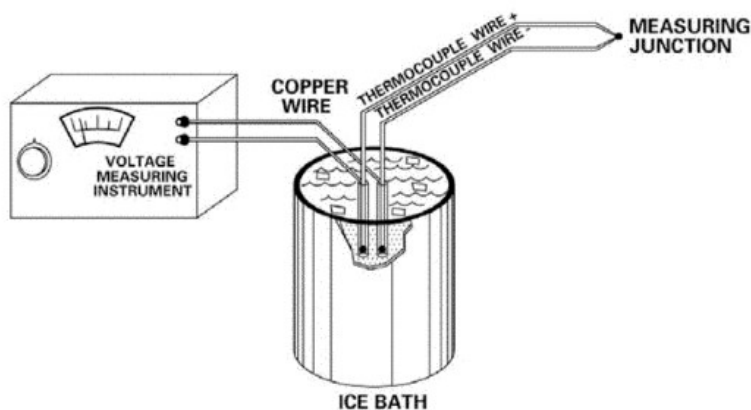


Obrázek 5.2. - Schéma termočláanky [19]

hot end – horký konec; *cold junctions* – studené spoje; *thermocouple materiál* – materiál termočláanky; *copper* – měď; *voltage metr* – měřič napětí

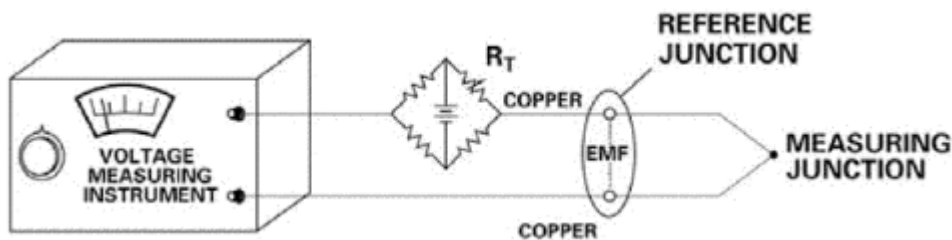
5.1. Kompenzace termočlánku

Jelikož napětí je přímo úměrné rozdílu teplot měřeného a referenčního spoje, tak je získána relativní hodnota teploty. Aby byla určena absolutní hodnota teploty, je potřeba vědět hodnotu teploty referenčního spoje. Toho lze dosáhnout několika způsoby. Prvním způsobem je tzv. ledová lázeň (viz. obrázek 4.3). Referenční spoj se vloží do ledové lázně s teplotou 0°C . Protože je teplota referenčního spoje známa a charakteristika termočlánku se odvíjí od 0°C , může být teplota určena z naměřeného napětí. Druhou metodou je kompenzace pomocí hardwaru (viz. obrázek 4.4). Principem je, že se do obvodu přidá zdroj proměnného napětí. Zdroj napětí generuje kompenzující napětí podle teploty okolí. Poslední možností je softwarová kompenzace. K tomu se použije měřicí systém, který se dá programovat a nahraje se potřebný software, který spočte hodnotu teploty v měřicím spoji. Zjistí se teplota referenčního spoje pomocí teplotního sensoru, například termistoru. Z hodnoty teploty referenčního spoje a podle rovnice závislosti napětí na teplotě závislé na typu termočlánku (viz. obrázek 4.6) software dopočte teplotu měřeného spoje [17].



Obrázek 5.3 - Schéma kompenzace ledovou lázní [20]

measuring junction – měřící spoj; thermocouple wire – drát termočlánku; ice bath – ledová lázeň; copper wire – měděný drát; voltage measuring instrument – měřič napětí



Obrázek 5.4 - Schéma kompenzace pomocí součástky měnící napětí [20]

measuring junction – měřící spoj; reference junction – referenční spoj; copper – měď; voltage measuring instrument – měřič napětí

5.2. Typy spojů

Neizolovaný spoj

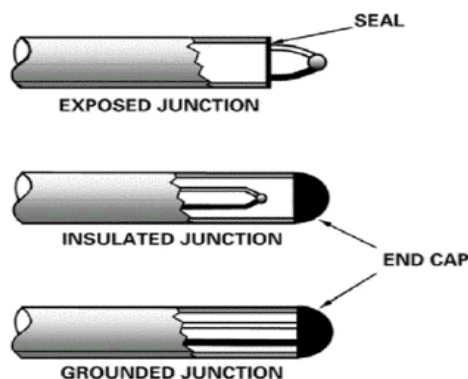
U tohoto typu spoje špička termočlánku vystupuje z pouzdra, spoj je tak v přímém kontaktu s měřeným místem. To umožňuje rychlejší a přesnější výsledky. Nevýhodou této konstrukce spoje je náchylnost na poškození, protože není chráněn od okolního prostředí [20]. Převážně se používá pro měření teploty plynů nebo kapalin, proto špička bývá pokryta izolačním nátěrem. Pouzdro, ve kterém je termočlánek umístěn musí být utěsněno, aby se vlhkost nedostala do termočlánku [21].

Izolovaný spoj

Tento spoj je celkově izolovaný od okolního prostředí. Zároveň je také izolovaný od samotného pouzdra. Termočlánek je v pouzdře zapuštěný a obalený izolačním materiálem [20]. Výhodou tohoto typu je, že spoj je chráněn před okolním poškozením. Obvod je izolovaný a lze jednoduše změřit jeho izolační odpor, takže lze diagnostikovat případně vzniklé vady v obvodu. Menší nevýhodou je pak delší doba odezvy termočlánku než u neizolovaného spoje a problematická výroba menších průměrů [21].

Uzemněný spoj

Dráty termočlánku jsou přímo svařeny s vnitřní částí pouzdra. Tato konstrukce dosahuje dobrého vedení tepla. Díky tomu tento typ má rychlou odezvu na změnu teploty. Další výhodou je i jednoduchost konstrukce [20]. Nevýhodou pak bývá, že termočlánek může nepříznivě reagovat s pouzdrem. Tento typ je také náchylný k poruše otevřeného obvodu [21]. Tento typ se doporučuje používat pro měření plynů, kapalin a pro vysokotlaké aplikace [20].

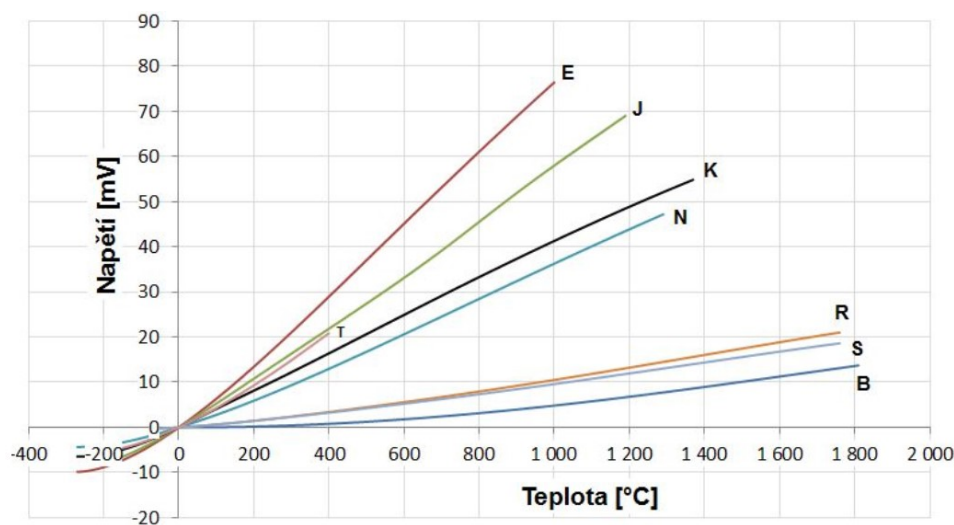


Obrázek 5.5 - Typy spojů [20]

exposed junction – neizolovaný spoj; insulated junction – izolovaný spoj; grounded junction – uzemněný spoj; seal – těsnění; end cap – koncový spoj

5.3. Druhy termočlánků














































Termočlánky se vyrábějí v různých kombinacích kovů (přehled základních typů v tabulce 4.1.). Jejich rozsah pro měření se mění v závislosti na použitých kovech (viz. níže na obrázku 4.6). Není to ale jediná věc, která ovlivňuje vlastnosti. Záleží také na průměru drátu. Nejčastěji používaným termočlánkem je typ K. Má dobrý rozsah teplot, hodí se do oxidačních atmosfér a je levnější než termočlánky vyrobeny z platiny. Nevýhoda je, když termočlánek se použije nad teplotu 1150°C. I když je schopný měřit do teploty 1250°C, tak jeho přesnost pod 300°C se zhorší. V poslední době ho začíná nahrazovat termočlánek typu N. Tento typ má lepší stabilitu než zbytek typů termočlánků. Na rozdíl od typu K má lepší odolnost proti oxidaci u větších teplot a delší životnost. Všeobecně platinové termočlánky typu B R S se používají pro měření vyšších teplot. Platina patří mezi drahé kovy, takže nevýhodou těchto termočlánků je jejich cena. Další nevýhodou je také, že se můžou používat jen v oxidující atmosféře. Termočlánek typu E se hodí i pro velmi nízké teploty - materiál nekoroduje za velmi nízkých teplot. Obe dvě ramena termočlánku jsou vysoce odolné proti korozi. To dovoluje použití v oxidující atmosféře. Typ J vychází cenově vcelku levně, může být použitý v neutrální nebo redukční atmosféře. Nedoporučuje se používat pro nízké teploty. Kvůli složení jednoho ramena z železa je velmi náchylný na korozi. Poslední typ termočlánku – typ T má malý rozsah teplot a nedá se používat pro vysoké teploty. Mezi jeho přednosti však patří odolnost proti atmosférické korozi a vlhkost nemá vliv na jeho funkci. Díky jeho velké stabilitě a přesnosti se tento typ používá ve fyzikálních oborech, kde je potřeba měřit velmi nízké teploty. Každý z těchto typů má své barevné značení, které je zobrazeno v obrázku 5.7. [17] [22]



Obrázek 5.6 - Charakteristika termočlánku; závislost teploty na napětí [23]

Typ	Složení termočlánu		Použitelný rozsah měření teplot	Nezaručitelný rozsah měření	tolerance	
	kladné rameno	záporné rameno			standartní	speciální
N	nikl + 14% chrom + 1,5% křemík	nikl + 4,4% křemík + 0,1 % hořčík	0°C až 1250°C	-270°C až 1300°C	±2,2 nebo ±0,75%	±1,1 nebo 0,4%
K	nikl + 10% chrom	nikl + 5% hliník + křemík	0°C až 1250°C	-270°C až 1260°C	±2,2 nebo ±0,75%	±1,1 nebo 0,4%
B	platina + 30% rhodium	platina + 6% rhodium	870°C až 1700°C	0°C až 1820°C	±0,5%	±0,25%
E	nikl + 10% chrom	55% měď + nikl 45%	-190°C až 900°C	-270°C až 1000°C	±1,7 nebo 1%	/
J	železo	55% měď + nikl 45%	0°C až 750°C	-210°C až 870°C	±2,2 nebo ±0,75%	±1,1 nebo 0,4%
R	platina + 13% rhodium	platina	0°C až 1480°C	-50°C až 1760°C	±1,5 nebo ±0,25%	±0,6 nebo ±0,1%
S	platina + 10% rhodium	platina	0°C až 1480°C	-50°C až 1760°C	±1,5 nebo ±0,25%	±0,6 nebo ±0,1%
T	měď	měď + nikl	-190°C až 370°C	-270°C až 400°C	±1 nebo ±1,5%	/

Tabulka 5.1 - Složení termočlánu a rozsah teplot [19] [22]

TYP	BAREVNÉ ZNAČENÍ IEC 584-3			BAREVNÉ ZNAČENÍ ANSI MC 96.1		
	Konektor	Termočlánek	Prodlužovací vedení	Konektor	Termočlánek	Prodlužovací vedení
B					NESPECIFIKOVÁNO	
E						
J						
K						
N						
R					NESPECIFIKOVÁNO	
S					NESPECIFIKOVÁNO	
T						

Obrázek 5.7 – Barevné značení termočlánu podle norem [23]

6. Svařované materiály

6.1. Nicrosil

Nicrosil je austenitická slitina niklu, chromu a křemíku (NiCrSi) [24]. Nicrosil byl vyvinut s ohledem odstranění nevýhod kladné části termočlánku typu K. Tato slitina se používá jako pozitivní rameno termočlánku typu N, protože funguje dobře v oxidační atmosféře. Hlavní důvod vývoje této slitiny je, abychom dosáhli spolehlivějších hodnot mezi 1000-1300°C. Tento typ termočlánku nabízí vyšší termoelektrickou stabilitu ve vzduchu při teplotě větší než 1000°C [25]. Tato slitina zároveň nemůže být vystavena redukční, oxidačně redukční atmosféře nebo vakuu. Má lepší odolnost proti oxidaci ve vzduchu než termočlánky typu E, J, K [24]. Zvýšená koncentrace křemíku bude mít za následek vyšší oxidační stabilitu. Křemík vytváří na povrchu tenký povlak, který brání další oxidaci. Zvýšením koncentrace chromu je pak slitina stabilnější vůči změnám pod teplotou 600°C. Tato slitina lze bez problému pájet a lze svařovat všemi známými metodami svařování. Termoelektrické napětí slitiny se může měnit v důsledku mechanického nebo tepelného namáhání [25].

Chemické složení:

Ni	Cr	Si
základní	14,2%	1,5%

Tabulka 6.1. – Chemické složení nicrosilu [24]

Mechanické a fyzické vlastnosti:

průměr drátu Ød	2 mm
smluvní mez kluzu $R_{p0.2}$	310 MPa
mez pevnosti R_m	800 MPa
prodloužení A	35 %
tvrdost HV	160
hustota ρ	8530 Kg/m ³
tepelná vodivost (při teplotě 20 °C) λ	13 W/m·K
bod tavení T_t	1420 °C
magnetické vlastnosti	není magnetický

Tabulka 6.2. – Mechanické a fyzické vlastnosti nicrosilu [24] [25]

6.2. Nisil

Nisil je austenitická slitina niklu a křemíku s malým množstvím hořčíku. Byl vyvinutý jako protipól ke kladnému rameni z nicrosilu u termočlánku typu N. Nisil je tedy používán jako záporné rameno. Stejně jako u nicrosilu tato slitina nabízí lepší termoelektrickou stabilitu ve vzduchu nad 1000°C a lépe odolává oxidaci než termočlánky typu E, J, K [27]. Lepší odolnost proti oxidaci je dosažena díky přidanému množství křemíku a hořčíku. Ty oxidují na povrchu a vytváří tak bariéru před další oxidací [26]. Nisil by neměl být vystaven plynům které obsahují síru [8]. Slitina lze pájet a je možno ji svařovat všemi známými metodami [26].

Chemické složení:

Ni	Si	Mg
základní	4,3%	0,1%

Tabulka 6.3. – Chemické složení nisilu [27]

Mechanické a fyzické vlastnosti:

průměr drátu $\varnothing d$	2 mm
smluvní mez kluzu $R_{p0.2}$	300 MPa
mez pevnosti R_m	680 MPa
prodloužení A	33 %
tvrdost HV	130
hustota ρ	8585 Kg/m ³
tepelná vodivost (při teplotě 20 °C) λ	23 W/m·K
bod tavení T_t	1341 °C
magnetické vlastnosti	není magnetický

Tabulka 6.4. – Mechanické a fyzické vlastnosti nisilu [26] [27]

7. Svařovací zařízení

Pro svařování jsou používány zařízení firmy Trumpf, která patří mezi přední výrobce laserových a obráběcích zařízení. Zdrojem laserové paprsku je TruFiber 1000 s fokusační optikou FPO33. Proces svařování termočlásku probíhá v automatizovaném pracovišti TruLaser Cell 3000.

7.1. TruFiber 1000 a FPO33

Je to vláknový laser, což je zvláštní druh pevnolátkového laseru. Tento typ laseru byl zvolen na základě jeho vysoké kvality paprsku. Hodí se pro svařování drobných součástí díky vzniku malé tepelně ovlivněné zóny při procesu svařování, to je dáno malým průměrem laserového paprsku. Vláknový laser se také vyznačuje rychlostí procesu, proto má dobré uplatnění ve výrobě. Laserový paprsek je ovládán pomocí programovatelné fokusační optiky FPO33. Ta může pracovat v pulsním i kontinuálním režimu.

Laserová technologie	vláknový laser	Optika	
Výkon laseru	1000 W	Maximální výkon laseru	8000 W
Maximální odchylka výkonu	±1 %	Vlnová délka	1030-1070 nm
Nastavitelný rozsah výkonu	30-1000 W	Standartní kolimace	150 mm
Vlnová délka	1070 nm	Dostupné ohniskové vzdálenosti	255 mm
Minimální průměr optického kabelu	20 µm		345 mm
			450 mm
Chlazení	voda	Maximální pracovní plocha – eliptická	180 mm x 104 mm
			240 mm x 140 mm
			320 mm x 190 mm

Tabulka 7.1. – Parametry laseru a optiky



Obrázek 7.1. – Laserový zdroj TruFiber 1000



Obrázek 7.2. – Fokusační optika FPO 33-2

7.2. TruLaser Cell 3000

TruLaser 3000 je plně automatizované pracoviště schopné pracovat v pěti osách. Poskytuje možnost pro dvoudimenzionální i třídimenzionální aplikace. Toto pracoviště je určeno pro svařování nebo řezání laserem. Jeho hlavní části jsou: tělo stroje, osový systém, držák obrobků, řídicí panel a odsávání. Výhodou je možnost zapojení dvou druhů laserových zdrojů díky přepínači paprsků. Na základě toho jsme schopni využít různé vlastnosti paprsku laserů a přepínat mezi zdroji pro různé aplikace. Modulární držák obrobků umožňuje přizpůsobení upínání v závislosti na svařovaném či řezaném obrobku. V našem případě jsme použili přípravek pro svařování termočláunku, který byl na tento držák upevněn.

Laserové pracoviště	
Rozsah pojezdu osy x	800 mm
Rozsah pojezdu osy y	600 mm
Rozsah pojezdu osy z	400 mm
Rozsah pojezdu osy b	+ - 135°
Maximální osová rychlost v ose x, y, z	50 m/min
Maximální osová rychlost osy b	120 1/min
Maximální osově zrychlení v ose x, y, z	10 m/s ²
Maximální osově zrychlení v osy b	130 rad/s ²
Přesnost os x, y, z	0.015 mm
Přesnost osy b	0.02°

Tabulka 7.2. – Parametry Laserového pracoviště

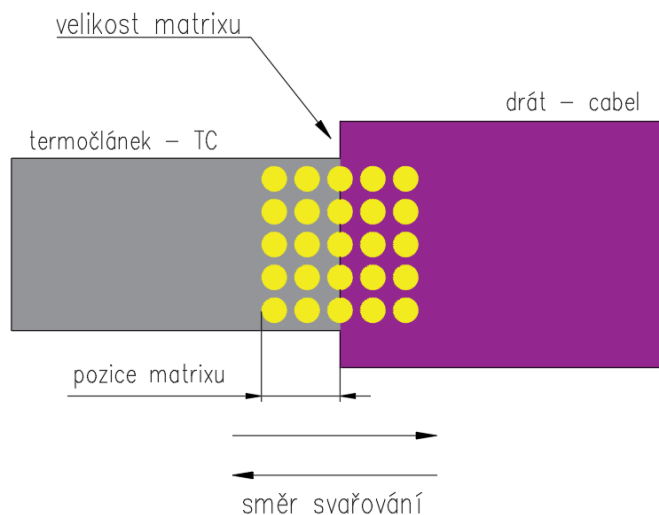


Obrázek 7.3. – Automatizované pracoviště TruLaser Cell 3000

8. Experiment

8.1. Návrh 1. experimentu

Cílem prvního experimentu je určit vhodnost předem zvolených parametrů pro nicrosil (růžový drát). Pro zachování technologického postupu se bude svařovat i nisil (bílý drát). Vyhodnocovat se však budou jenom svary nicrosilu. Svary se budou kontrolovat nejprve vizuálně a poté všechny vzorky se ověří tahovou zkouškou. Pokud nějaký vzorek u tahové zkoušky dosáhne malých hodnot, bude se studovat příčina nízkých hodnot. V tomto experimentu budou měněny parametry energie, směru svařování, velikost matrixu a rozložení matrixu. Pro lepší představu parametrů a jejich význam jsou znázorněny na obrázku 8.1. Svařeno bude 12 skupin s předem navrženými parametry. Jestliže budou parametry vhodné pro vytvoření svaru, tak pro každou skupinu bude svařeno minimálně 5 vzorků.



Obrázek 8.1. – Schéma svařování a umístění matrixu

Skupina 1			Skupina 2		
	růžový	bílý		růžový	bílý
Energie (J)	2.035	2.42	Energie (J)	1.85	2.2
Směr	cabel => TC		Směr	cabel => TC	
Velikost matrixu	6x6		Velikost matrixu	6x6	
Rozložení spotů matrixu	3cabel/3TC		Rozložení spotů matrixu	3cabel/3TC	
Skupina 3			Skupina 4		
	růžový	bílý		růžový	bílý
Energie (J)	1.665	1.98	Energie (J)	1.665	1.98
Směr	cabel => TC		Směr	TC => cabel	
Velikost matrixu	6x6		Velikost matrixu	6x6	
Rozložení spotů matrixu	3cabel/3TC		Rozložení spotů matrixu	3cabel/3TC	

Skupina 5			Skupina 6		
	růžový	bílý		růžový	bílý
Energie (J)	1.85	2.2	Energie (J)	1.85	2.2
Směr	TC => cabel		Směr	TC => cabel	
Velikost matrixu	6x6		Velikost matrixu	5x5	
Rozložení spotů matrixu	4cabel/2TC		Rozložení spotů matrixu	3.5cabel/1.5TC	
Skupina 7			Skupina 8		
	růžový	bílý		růžový	bílý
Energie (J)	1.85	2.2	Energie (J)	1.85	2.2
Směr	cabel => TC		Směr	cabel => TC	
Velikost matrixu	5x5		Velikost matrixu	6x6	
Rozložení spotů matrixu	1.5cabel/3.5TC		Rozložení spotů matrixu	2cabel/4TC	
Skupina 9			Skupina 10		
	růžový	bílý		růžový	bílý
Energie (J)	1.85	2.2	Energie (J)	2.035	2.42
Směr	TC => cabel		Směr	TC => cabel	
Velikost matrixu	4x4		Velikost matrixu	4x4	
Rozložení spotů matrixu	2.5cabel/1.5TC		Rozložení spotů matrixu	2.5cabel/1.5TC	
Skupina 11			Skupina 12		
	růžový	bílý		růžový	bílý
Energie (J)	1.48	1.76	Energie (J)	1.48	1.76
Směr	TC => cabel		Směr	TC => cabel	
Velikost matrixu	5x5		Velikost matrixu	5x5	
Rozložení spotů matrixu	2.5cabel/2.5TC		Rozložení spotů matrixu	3.5cabel/1.5TC	

Tabulka 8.1. – Parametry svařování

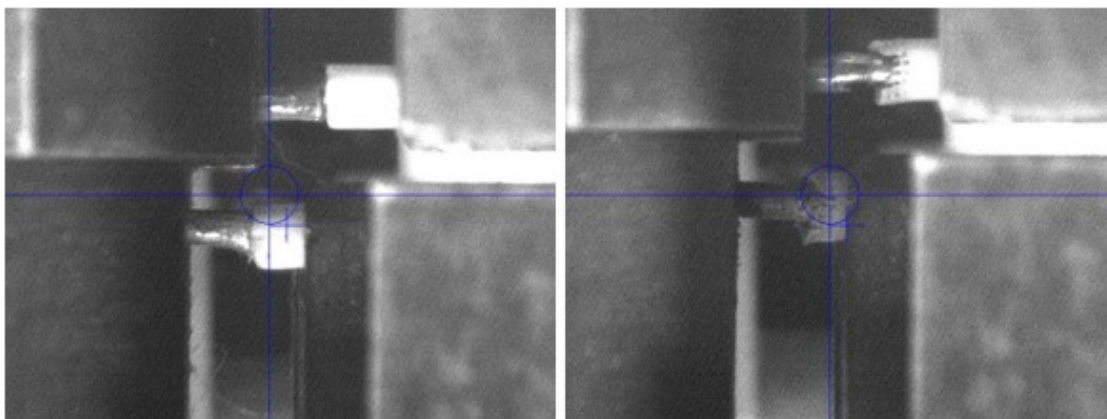
8.2. Výsledky 2. experimentu

Vzorek číslo	Hodnota tahové zkoušky (N)		Místo prasknutí		Vzorek číslo	Hodnota tahové zkoušky (N)		Místo prasknutí	
	Růžový	bílý	Růžový	bílý		Růžový	bílý	Růžový	bílý
Skupina 1					Skupina 7				
N1	ns	198,02	-	svar	N30	279,45	226,15	svar	zm
Skupina 2					N31	161,30	224,70	zm	too
N2	ns	ns	-	-	N32	282,63	217,57	svar	svar
Skupina 3					N33	299,42	242,21	zm	too
N3	292,49	249,75	zm	svar	N34	301,32	277,61	svar	too
N4	298,63	209,27	zm	svar	Skupina 8				
N5	253,60	225,47	zm	svar	N35	ns	ns	-	-
N6	273,42	219,17	zm	zm	N36	265,16	256,27	svar	zm
N7	250,93	218,32	zm	zm	N37	ns	ns	-	-
Skupina 4					N38	ns	ns	-	-
N8	286,29	251,26	zm	svar	N39	ns	243,87	-	zm
N9	251,16	224,30	too	too	Skupina 9				
N10	251,46	239,14	zm	zm	N40	320,49	277,25	too	zm
N11	267,20	235,25	zm	zm	N41	269,34	279,35	svar	zm
N12	262,37	226,96	zm	svar	N42	279,41	259,28	svar	zm
N13	303,46	228,18	zm	svar	N43	165,50	284,94	svar	zm
N14	280,11	232,81	zm	too	N44	199,07	212,35	too	too
Skupina 5					Skupina 10				
N15	ns	229,03	-	svar	N45	265,37	26,54	svar	too
N16	273,36	228,98	svar	svar	N46	308,99	251,57	svar	zm
N17	268,97	211,75	zm	svar	N47	257,91	278,55	haz	svar
N18	ns	232,49	too	zm	N48	274,64	256,18	haz	svar
N19	267,51	230,54	zm	zm	N49	271,72	295,94	svar	zm
N20	281,43	ns	zm	-	Skupina 11				
N21	267,11	219,14	zm	svar	N50	250,05	261,42	svar	svar
N22	ns	ns	-	-	N51	290,83	267,11	svar	svar
N23	ns	ns	zm	-	N52	246,11	266,63	svar	zm
Skupina 6					N53	215,07	255,37	svar	svar
N24	281,77	249,44	zm	zm	N54	270,10	228,21	svar	svar
N25	249,98	191,97	zm	zm	N55	257,57	278,00	svar	zm
N26	287,51	273,28	zm	zm	Skupina 12				
N27	299,59	261,61	too	zm	N56	154,69	266,42	too	zm
N28	ns	277,25		too	N57	258,24	272,86	svar	zm
N29	285,13	268,46	zm	too	N58	266,82	242,37	svar	zm
					N59	250,45	184,38	svar	zm
					N60	256,75	233,61	svar	zm

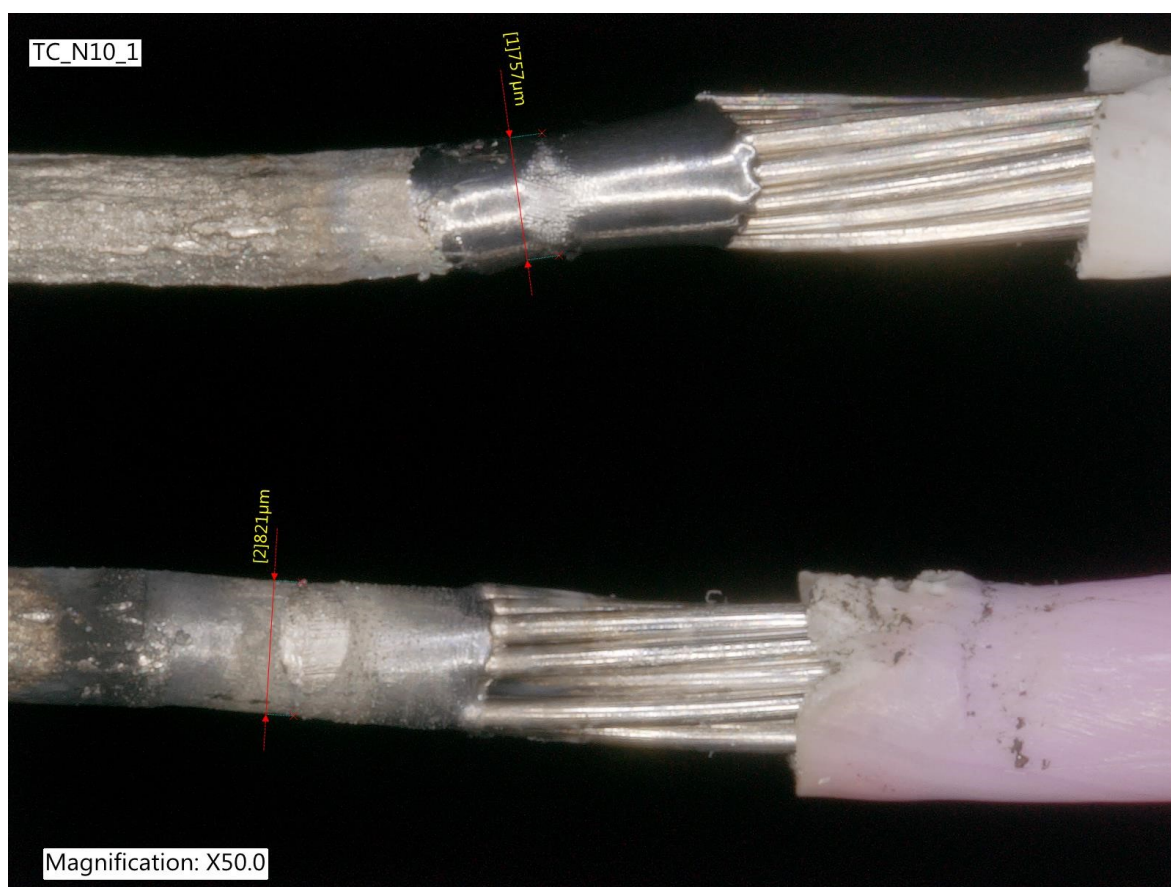
Legenda:

Tabulka 8.2. – Výsledky tahové zkoušky

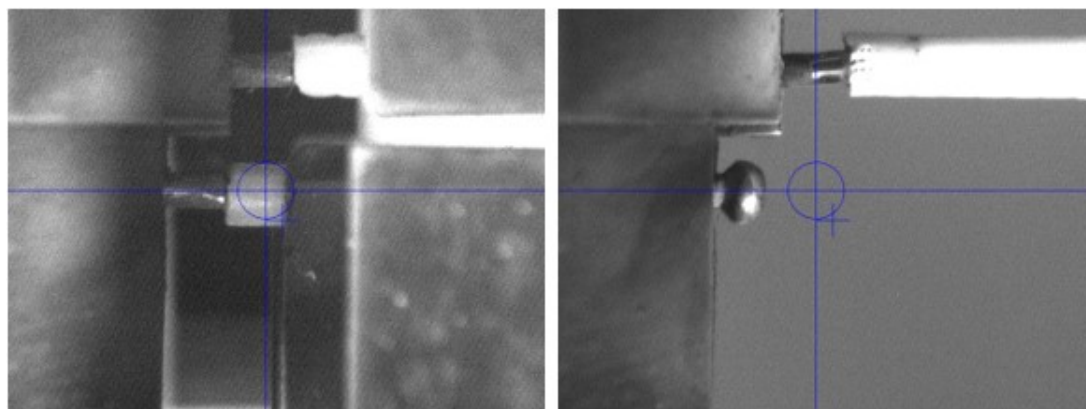
ns – nevytvořený svar; too – teplem ovlivněná oblast; zm – základní materiál



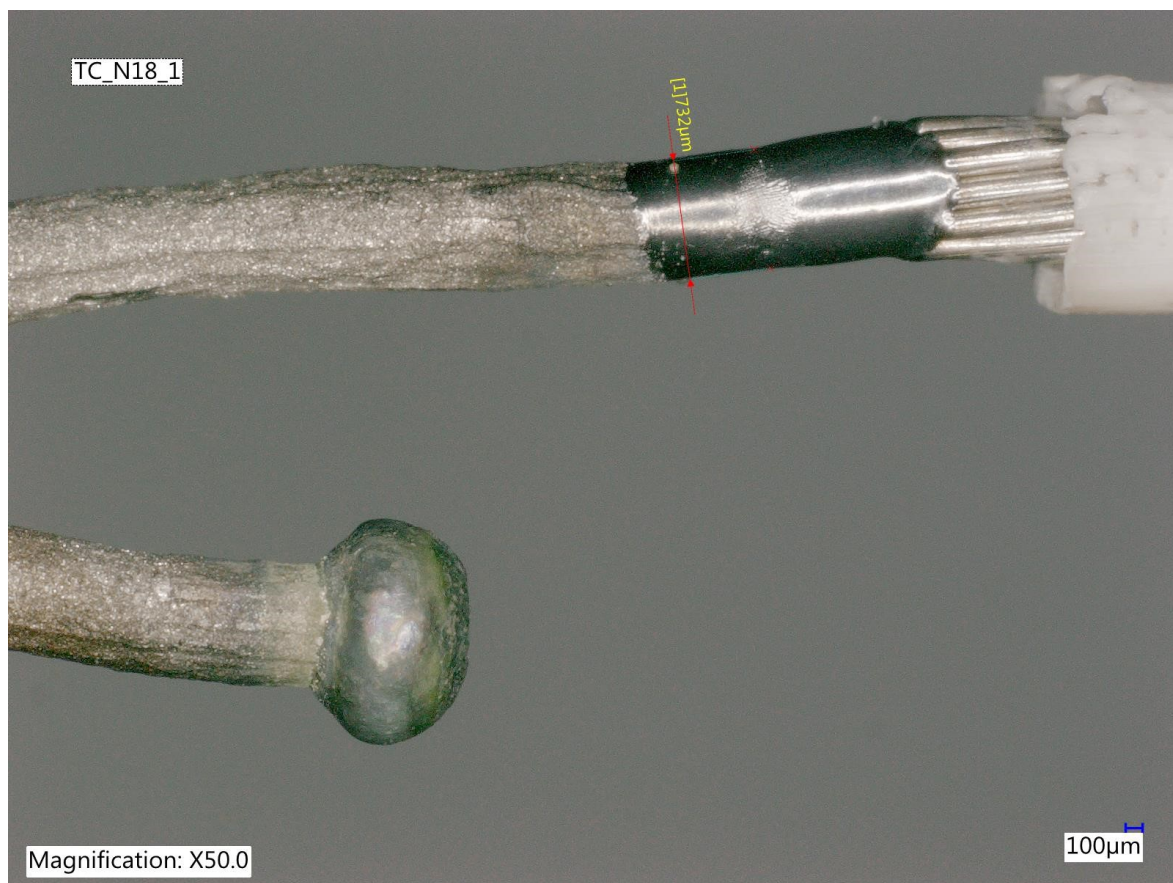
Obrázek 8.2. – Vzorek N10 před a po svařování



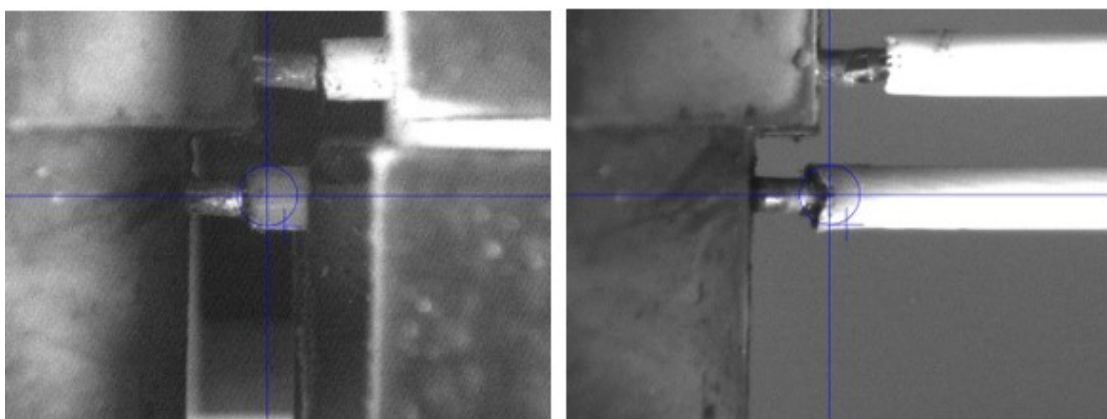
Obrázek 8.3. – Vzorek N10 měřený mikroskopem



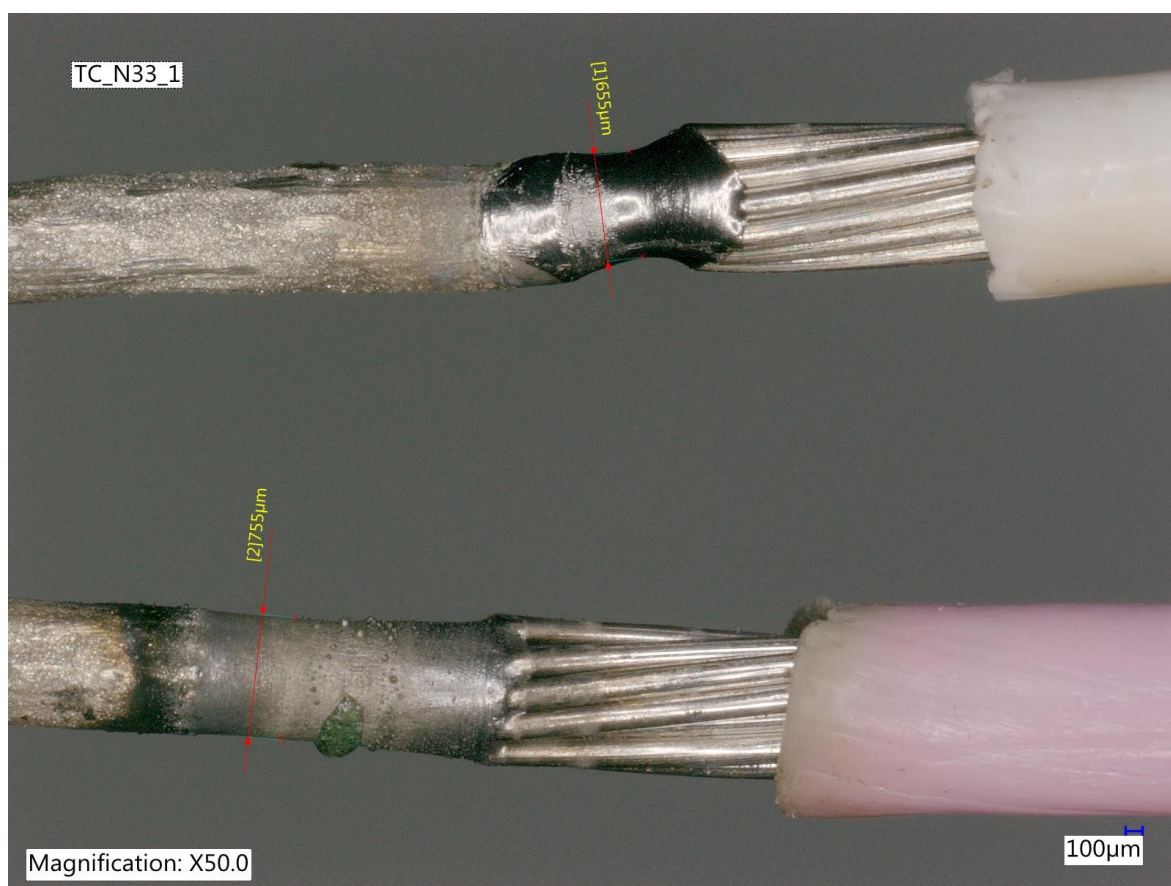
Obrázek 8.4. – Vzorek N18 před a po svařování



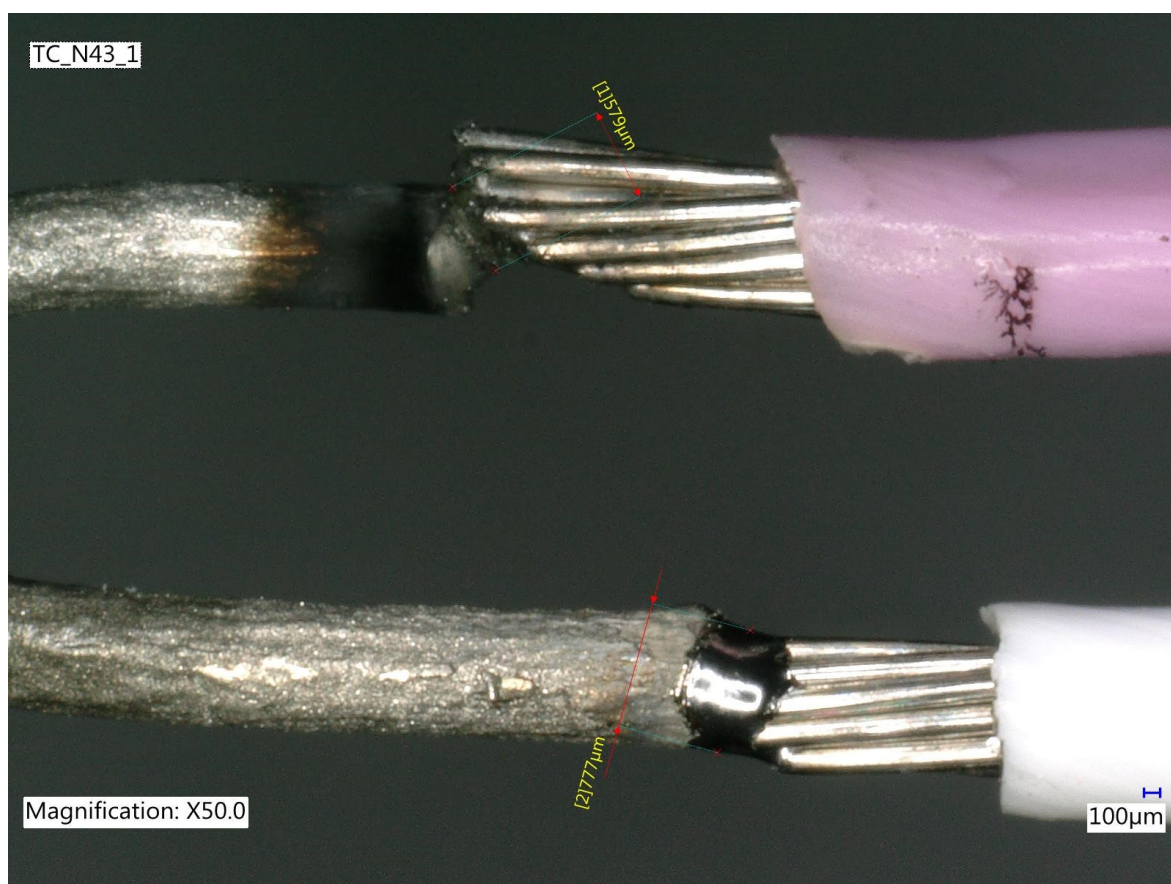
Obrázek 8.5. – Vzorek N18 měřený mikroskopem



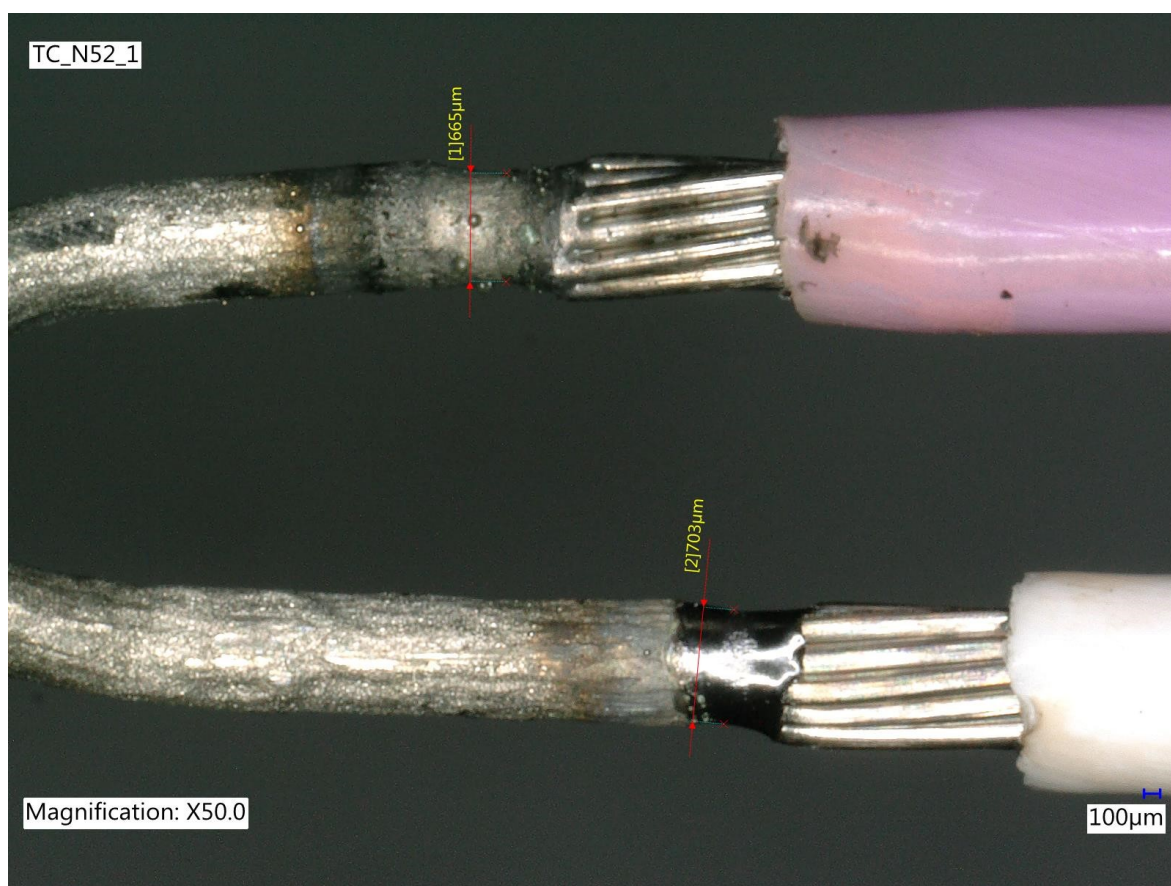
Obrázek 8.6. – Vzorek N33 před a po svařování



Obrázek 8.7. – Vzorek N33 měřený mikroskopem



Obrázek 8.8. – Vzorek N43 měřený mikroskopem – svar u růžového drátu s krčkem



Obrázek 8.9. – Vzorek N52 měřený mikroskopem – svar u růžového drátu s kuličkami

8.3. Vyhodnocení 1. experimentu

Z experimentu lze soudit, že svařovací parametry skupiny 1, 2, 5, 8 nejsou vhodné, kdy u skupin 1 a 2 se svařil jediný vzorek a usoudilo se, že tyto parametry nemají smysl. U všech těchto skupin byl matrix o velikosti 6x6 a hodnota energie byla vyšší než 1.85 J. Lze tak soudit, že vnesené množství tepla do svaru bylo příliš vysoké a svar se tak nevytvořil. Příklad takového nevytvořeného svaru můžeme vidět na obrázku 8.5. U zbytků skupin nebyla nikde zaznamenána nějaká značně nízká hodnota. Je požadováno, aby hodnoty tahové zkoušky byly vyšší než 50N, což splnili všechny svařené vzorky. U skupin 9, 10, 11, 12 vzorky po svařování nevypadali dobře, tvořili se krčky a jiné defekty viz. obrázek 8.8. a 8.9. Navíc rozptyl hodnot tahové zkoušky byl velký, což je taky nežádoucí. I když skupina 6 měla dobré hodnoty tahové zkoušky bez většího rozptylu, jeden svar se nevytvořil a hodnota vneseného tepla bude na hraně co dokážou svařované části pojmout. Hodnoty tahové zkoušky u skupiny 7 byly vysoké s minimálním rozptylem. Malou hodnotu tahové zkoušky měl z této skupiny vzorek N31. Prasknul však v základním materiálu a lze předpokládat, že svar by vydržel větší namáhání. Nejlépe dopadly skupiny 3 a 4 se stejnými parametry

energie, matrixu, rozložení matrixu. Jediný lišící se parametr je směr svařování, který neměl na výsledky žádný vliv. Hodnoty tahové zkoušky byly vysoké bez velkého rozptylu. Vizualně svary vypadaly nejlépe ze všech skupin. Parametry skupin 3 a 4 jsou zvoleny jako nejvhodnější pro tuto aplikaci. Svar z této skupiny je na obrázku 8.3.

8.4. Návrh 2. experimentu

Cílem druhého experimentu bylo simulovat vliv různých nečistot. Stejně jako v prvním experimentu se budou svary kontrolovat vizuálně a tahovou zkouškou. Navíc bude provedena zkouška mikro tvrdosti. V experimentu se bude svařovat 5 skupin po 10 vzorcích. První skupinou jsou klasické termočlánky z výroby, které prošly extra sušícím procesem z důvodu odstranění vodíku před svařováním. Druhou skupinou jsou termočlánky kontaminované MgO. To se zde může dostat během primární výroby termočlánku. U třetí skupiny je snaha kontaminovat svary vodíkem. Dráty termočlánku budou namočený do vody. U čtvrté skupiny se bude simulovat znečištění svarových ploch pomocí natření vazelínou o silikonovém základu. Poslední skupina termočlánku bude mít svarové plochy natřeny vazelínou o grafitovém základu. Cílem bylo kontaminovat svar uhlíkem. Parametry byly zvoleny tak, aby dodané teplo při svařování bylo vyšší než ve výrobě. Tyto parametry jsou uvedeny v tabulce 8.3. Všechny vzorky byly po svařování nafoceny a změřeny.

Parametry pro všechny skupiny		
	růžový	bílý
Energie (J)	1.85	2.2
Směr	cabel => TC	
Velikost matrixu	5x5	
Rozložení matrixu	3.5cabel/1.5TC	

Tabulka 8.3. – Parametry svařování 2. experimentu

Skupina č.1	Termočlánky po extra sušícím procesu
Skupina č.2	Termočlánky kontaminovány MgO
Skupina č.3	Velmi vysoká vlhkost povrchu termočlánku
Skupina č.4	Znečištěné svarové plochy termočlánku
Skupina č.5	Termočlánky kontaminovány uhlíkem

Tabulka 8.4. – Skupiny termočlánku pro experiment



Obrázek 8.10. – Povrch termočláňku po extra sušícím procesu – Vzorek N II – Skupina č.1



Obrázek 8.11. – Povrch termočláňku kontaminovaný MgO – Vzorek N3 – Skupina č.2



Obrázek 8.12. – Povrch zbytků skupin termočláňků – Vzorek N5 – Skupina č.3

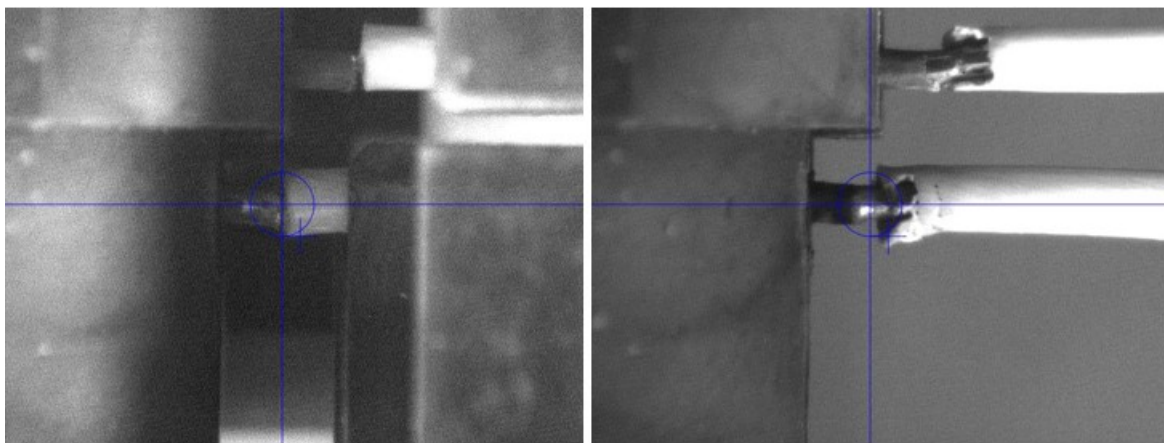
8.5. Výsledky 2. experimentu

Vzorek číslo	Hodnota tahové zkoušky (N)		Místo prasknutí		Vzorek číslo	Hodnota tahové zkoušky (N)		Místo prasknutí	
	Růžový	bílý	Růžový	bílý		Růžový	bílý	Růžový	bílý
Termočláanky po extra sušícím procesu					Termočláanky kontaminovány MgO				
N1	276,49	208,43	zm	zm	N1	254,5	246,72	svar	svar
N2	266,74	222,09	svar	zm	N2	268,33	263,35	zm	zm
N3	267,49	244,05	too	zm	N3	229,3	238,99	svar	zm
N4	271,21	217,80	svar	zm	N4	259,55	200,73	zm	too
N5	282,92	222,55	svar	zm	N5	264,72	242,18	zm	zm
N6	273,30	230,52	svar	zm	N6	245,97	233,67	svar	zm
N7	229,72	254,10	svar	too	N7	ns	188,69	-	too
N8	281,41	236,30	zm	zm	N8	180,63	251,26	too	zm
N9	266,06	206,70	too	svar	N9	262,26	246,83	svar	zm
N10	274,68	248,07	zm	zm	N10	240,76	254,48	svar	zm
Velmi vysoká vlhkost povrchu termočláanky					Znečištěné svarové plochy termočláanky				
N1	305,69	240,73	svar	svar	N1	307,98	238,42	svar	zm
N2	221,23	277,27	too	zm	N2	291,21	271,11	svar	svar
N3	245,15	276,15	too	zm	N3	294,06	258,52	svar	svar
N4	273,27	242,86	svar	zm	N4	332,97	282,23	zm	svar
N5	273,88	269,32	svar	zm	N5	269,15	267,11	svar	svar
N6	266,28	237,08	svar	too	N6	235,29	242,42	svar	svar
N7	274,28	226,10	svar	zm	N7	229,7	224,08	svar	svar
N8	278,74	273,49	too	zm	N8	276,15	266,09	svar	zm
N9	263,06	258,64	svar	svar	N9	298,79	257,85	svar	svar
N10	299,40	275,63	too	zm	N10	256,6	242,29	zm	zm
Termočláanky kontaminovány uhlíkem									
N1	259,70	243,72	svar	svar					
N2	257,63	220,62	svar	svar					
N3	245,59	222,97	zm	zm					
N4	213,99	243,19	svar	svar					
N5	226,96	239,91	svar	svar					
N6	268,00	254,55	zm	svar					
N7	288,16	248,41	svar	svar					
N8	179,82	199,24	too	svar					
N9	277,37	212,90	svar	svar					
N10	211,27	227,15	svar	svar					

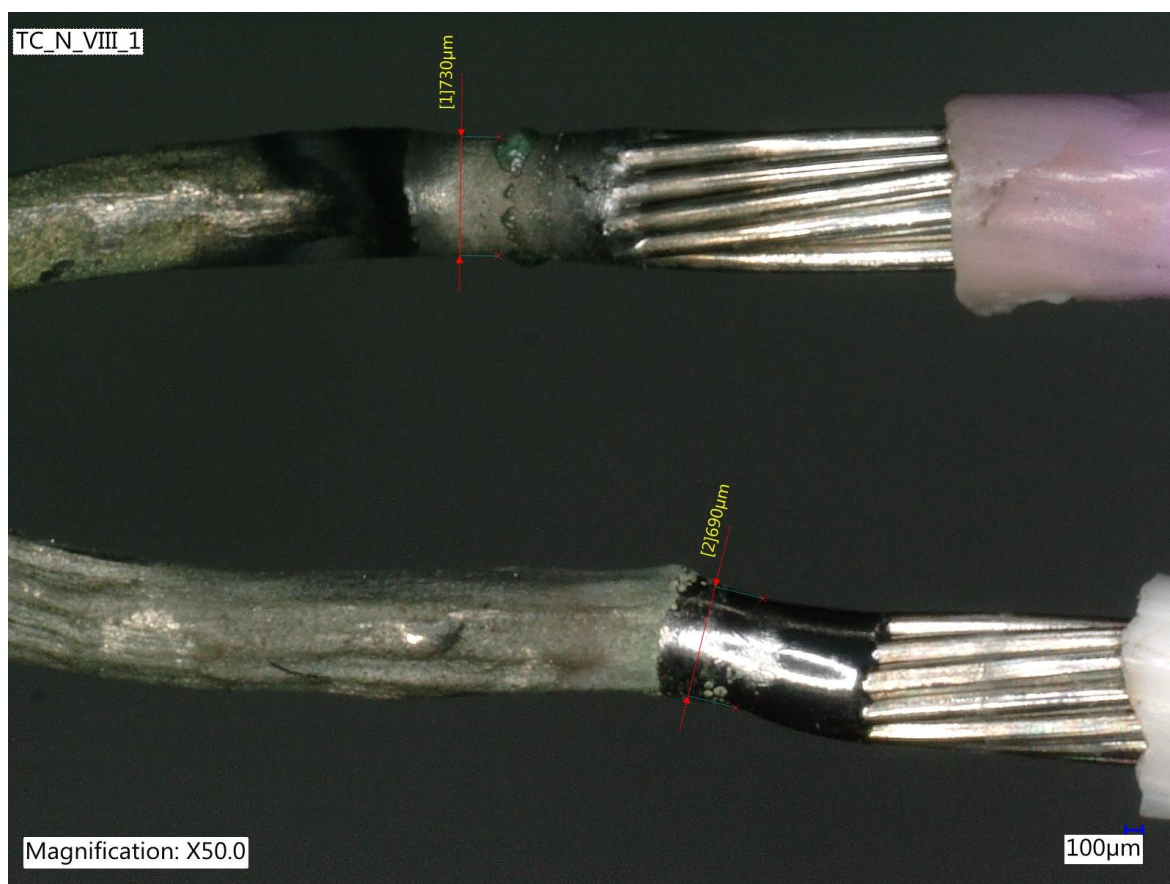
Tabulka 8.5 – Výsledky tahové zkoušky

Legenda:

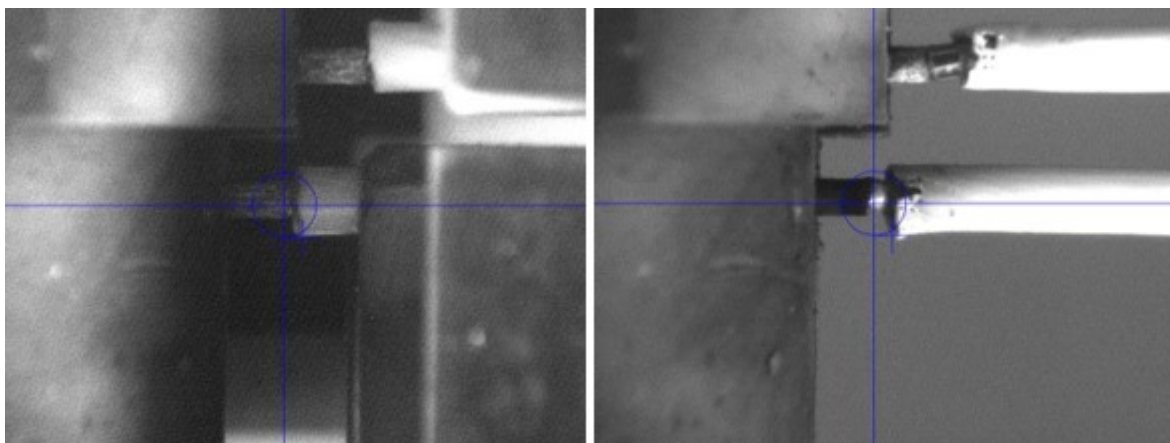
ns – nevytvořený svar; too – teplem ovlivněná oblast; zm – základní materiál



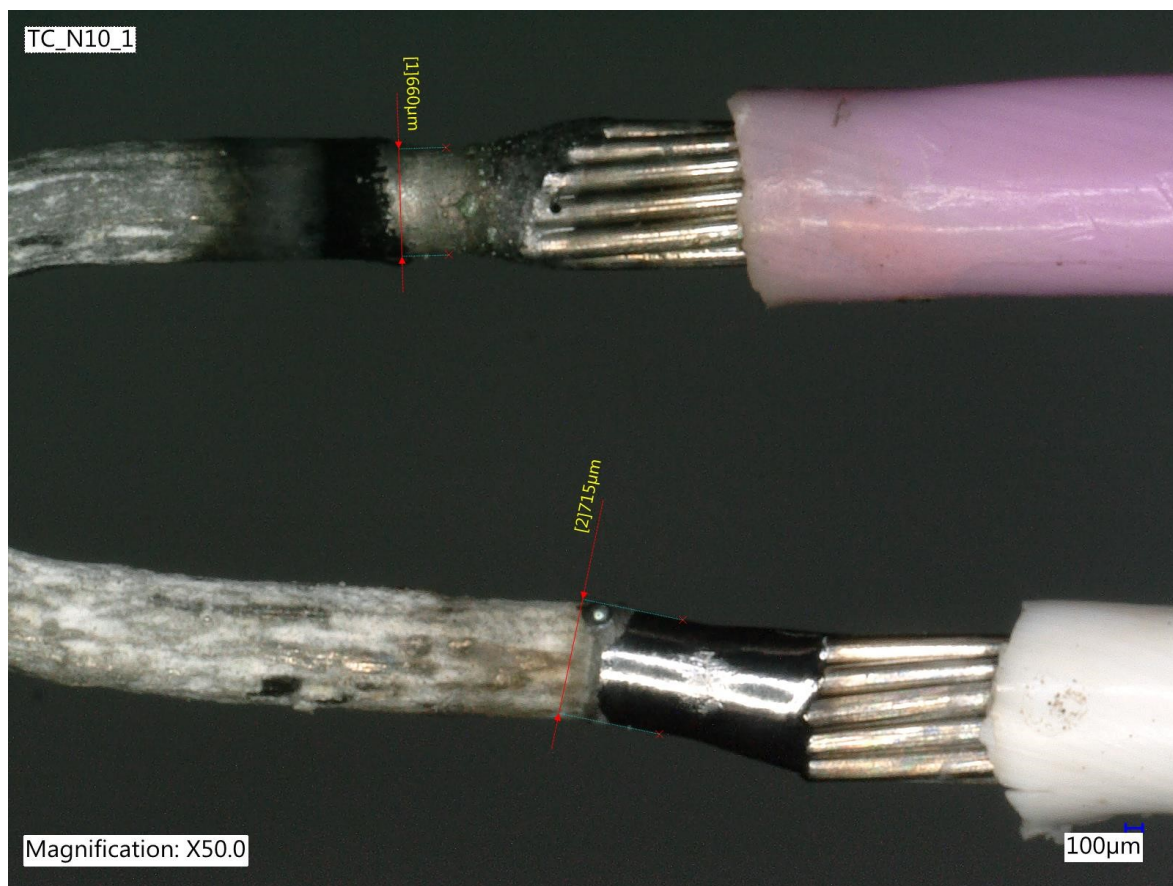
Obrázek 8.13. – Vzorek N8 skupina č.1 před a po svařování



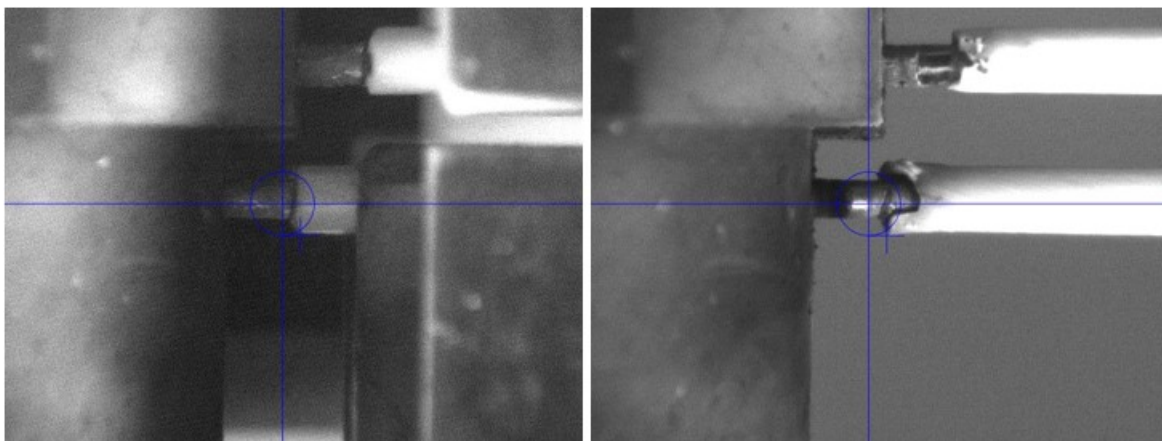
Obrázek 8.14. – Vzorek N8 skupina č.1 měřený mikroskopem



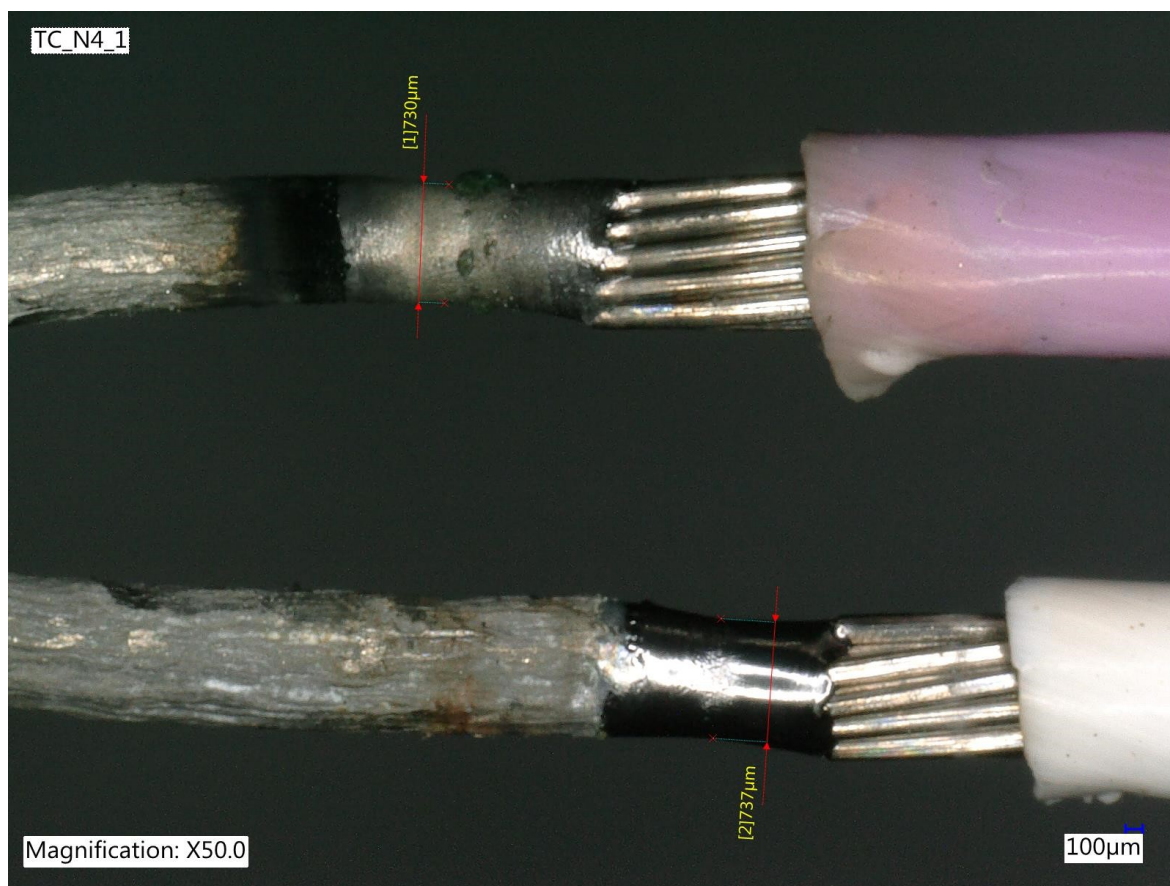
Obrázek 8.15. – Vzorek N10 skupina č.2 před a po svařování



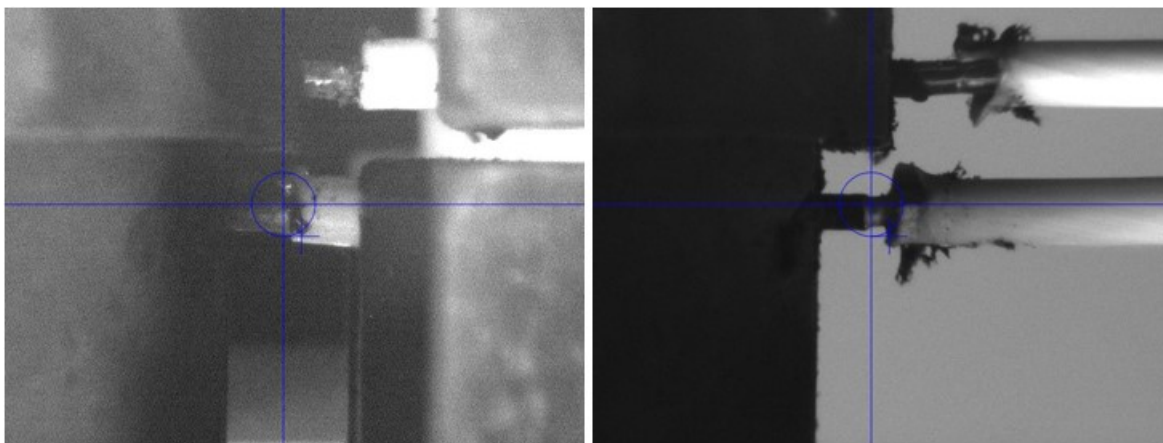
Obrázek 8.16. – Vzorek N10 skupina č.2 měřený mikroskopem



Obrázek 8.17. – Vzorek N4 skupina č.3 před a po svařování



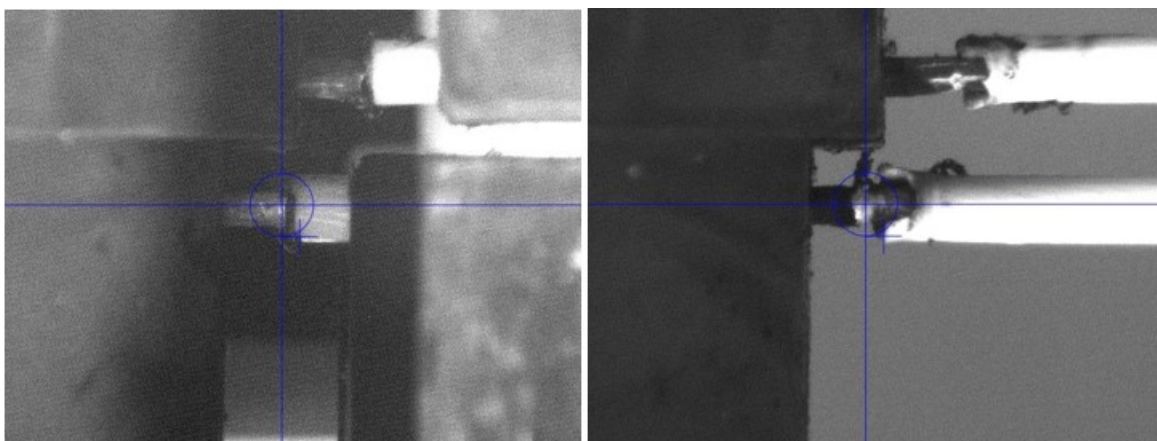
Obrázek 8.18. – Vzorek N4 skupina č.3 měřený mikroskopem



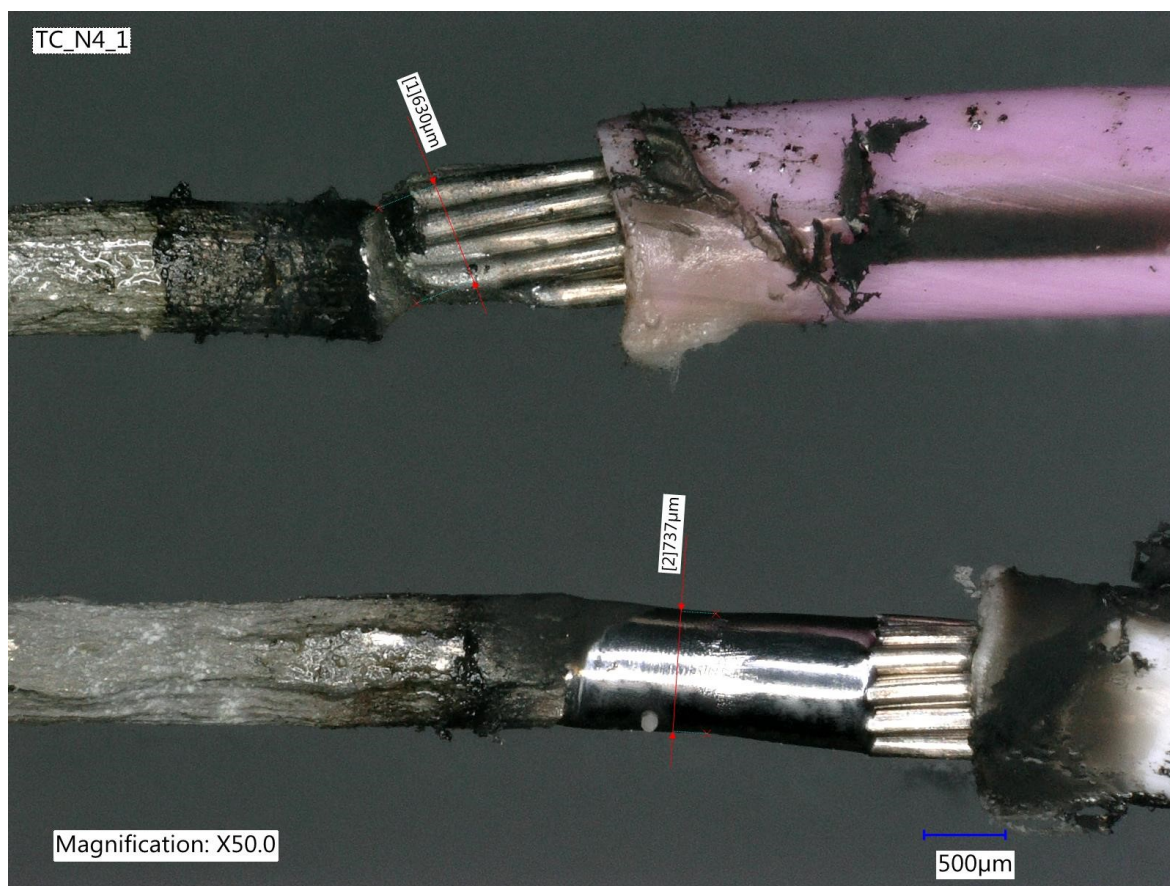
Obrázek 8.19. – Vzorek N7 skupina č.4 před a po svařování



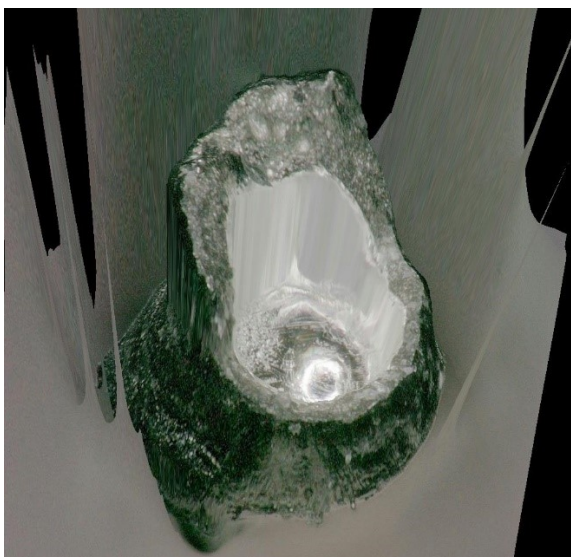
Obrázek 8.20. – Vzorek N7 skupina č.4 měřený mikroskopem



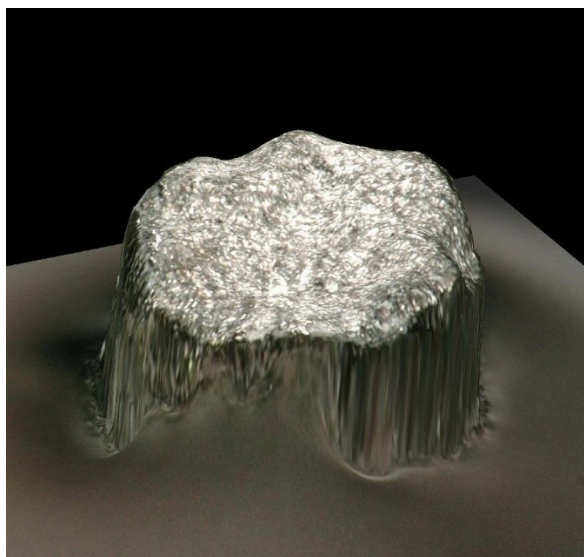
Obrázek 8.21. – Vzorek N4 skupina č.5 před a po svařování



Obrázek 8.22. – Vzorek N4 skupina č.5 měřený mikroskopem



Obrázek 8.23. – Lomová plocha vzorku N7 skupina č.1



Obrázek 8.24. – Lomová plocha vzorku N4 skupina č.3



Obrázek 8.25. – Lomová plocha vzorku N9 skupina č.1



Obrázek 8.26. – Lomová plocha vzorku N1 skupina č.2



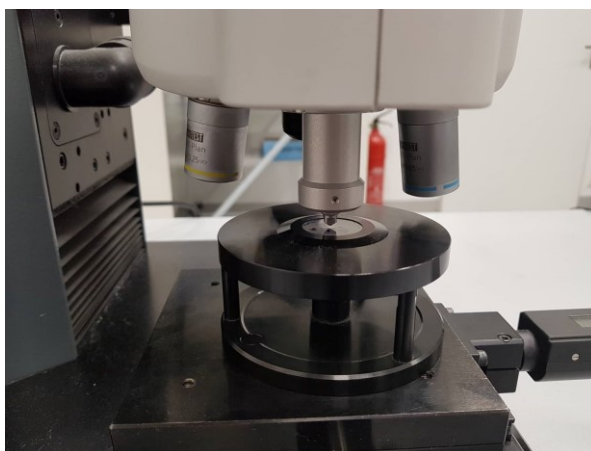
Obrázek 8.27. – Lomová plocha vzorku N3 skupina č.4



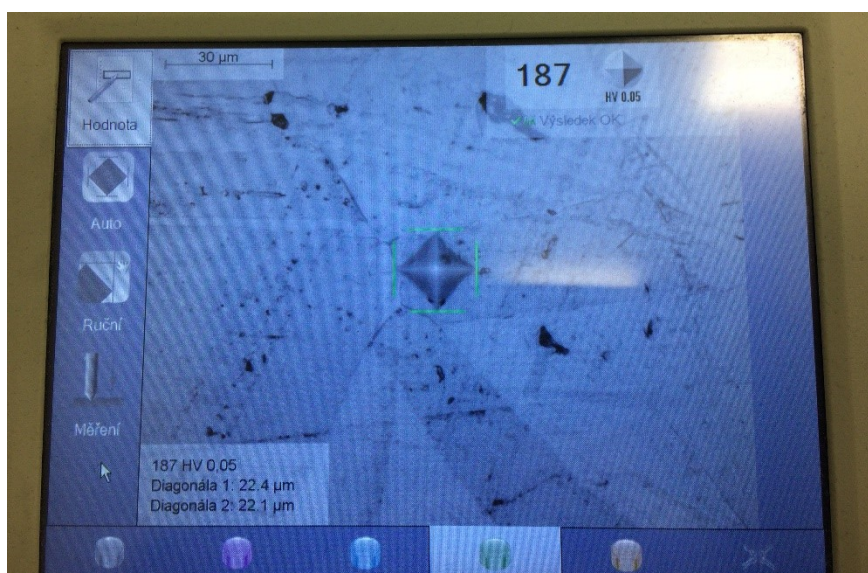
Obrázek 8.28. – Lomová plocha vzorku N5 skupina č.5

8.6. Mikrotvrdost

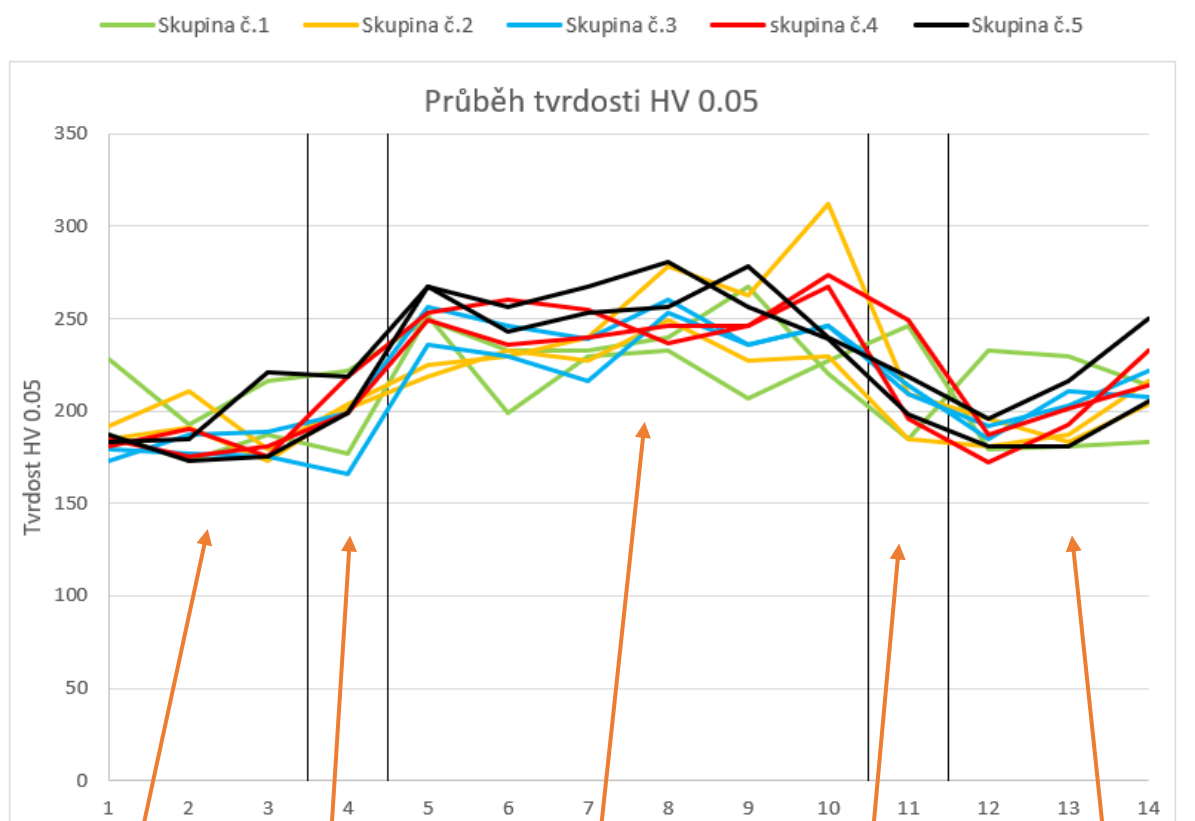
Pro zkoušku mikrotvrdosti byly svařeny z každé skupiny 2 vzorky. Po svaření vzorků byly svary zality a vybroušeny, aby bylo mikrotvrdost možnost měřit. Mikrotvrdost byla měřena na zařízení firmy STRUERS. Vzorek se upnul do přípravku a zreferoval se dotyk. Poté probíhalo měření. Pro naší aplikaci byla zvolena velikost zatížení HV 0.05, což odpovídá zatížení 50g. Na každém vzorku bylo provedeno 14 vtisků – 3 v základním materiálu termočlásku a drátu, 1 v teplotně ovlivněné zóně termočlásku i drátu a 6 vtisků ve svarovém spoji. V grafu nejsou konkrétní vzdálenosti z důvodu různé velikosti svarů. Pro místa vtisku je určeno jen jejich umístění z důvodu určení závislosti tvrdosti na oblasti svaru.



Obrázek 8.29. – Měření tvrdosti



Obrázek 8.30. – Měření velikosti vtisku



Graf 8.1. – Průběh tvrdosti dle Vickerse ve svaru

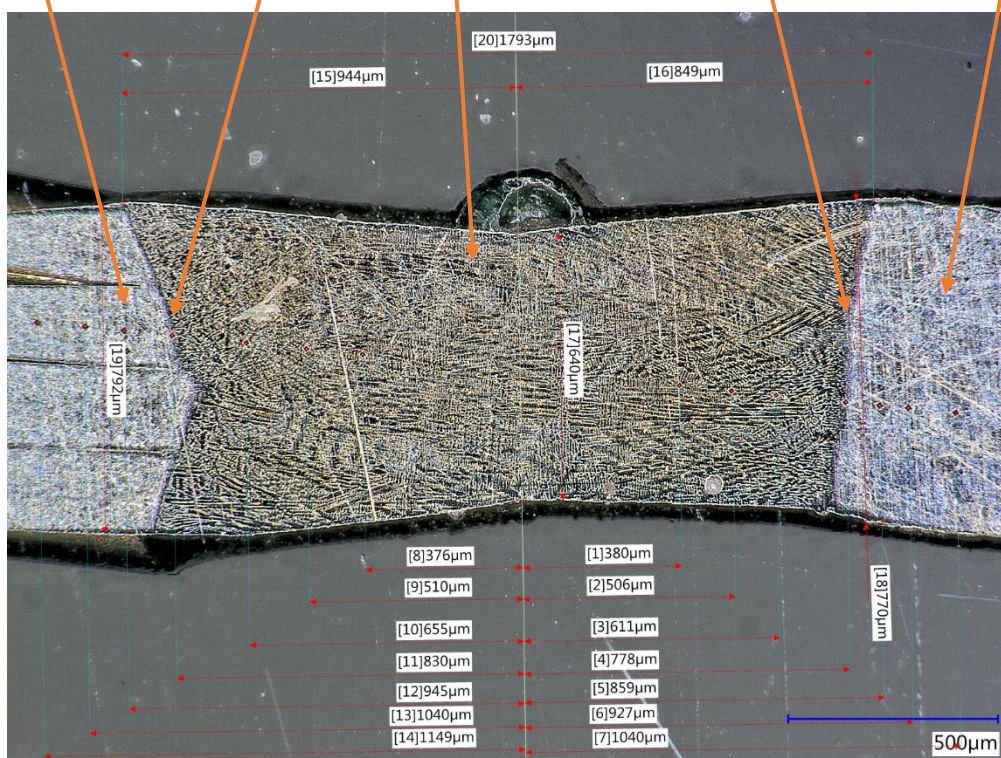
Základní materiál drátu

Teplotně ovlivněná oblast drátu

Svarový spoj

Teplotně ovlivněná oblast termočládku

Základní materiál termočládku



Obrázek 8.31. – Vzorek po zkoušce mikrotvrdosti se vzdálenostmi od středu svaru

8.7. Vyhodnocení 2. experimentu

Ze všech provedených testů a kontroly svaru je patrné, že kontaminace neměla nějaký významný vliv na kvalitu svaru. Všechny testy a kontrolami prošly všechny vzorky. Podle očekávání nejlépe dopadla skupina první, kdy hodnoty tahové zkoušky se stabilně pohybovaly kolem hodnoty 270N s minimálním rozptylem. Podobné hodnoty vykazovala i skupina třetí, avšak na rozdíl od skupiny první hodnoty už mají výraznější rozptyl. U čtvrté skupiny byly hodnoty průměrně vysoké, nicméně rozptyl hodnot je už vysoký a lze počítat s negativním vlivem na svařování. To lze vidět i na fotkách svarů, kdy se u svařených vzorků tvořily krčky viz. obrázek 8.20. U zbylých skupiny druhé a páté je rozptyl také vysoký. Navíc u těchto skupin lze sledovat pokles pevnosti v tahu. Z fotek svarů lze vidět i negativní vliv na tvoření svarů viz. obrázek 8.16. a obrázek 8.22. Lomové plochy svarů nevykazují žádnou známku křehkého lomu viz. obrázky 8.23 až 8.28. Krátery na obrázcích 8.23. a 8.28. vznikly v důsledku tvorby plynů z kontaminace povrchu komponent. Zkouška tvrdosti také nevykazuje žádné špatné hodnoty. Přestože jde vidět mírný nárůst hodnoty tvrdosti u kontaminovaných vzorků, převážně u kontaminace uhlíkem, tak všechny hodnoty splňují požadovanou hodnotu tvrdosti podle Vickerse 350. Ze všech zkoušek vyplývá že nejhorší vliv na svařování měla kontaminace uhlíkem a MgO. Svařování neprospívá žádná kontaminace svarových ploch, primárně je však třeba vyhnout se těmto dvěma kontaminacím.

9. Závěr

Bakalářská práce se zabývá laserovým svařováním termočlásku. Práce měla dva cíle. Prvním cílem bylo určit vhodnost parametrů pro svařování a druhým bylo simulovat vliv kontaminace svařovaných komponent při tomto procesu.

Teoretická část popisuje laserové, odporové, elektronové svařování. V závěru této části je i kapitola popisující termočlánek.

Experimentální část začíná popisem svařovaných materiálu, posléze pokračuje popisem zařízení potřebných k svařování TruFiber 1000 s optikou FPO33 a automatizovaným pracovištěm TruLaser Cell 3000. Tato část obsahuje i parametry zařízení. Experiment se soustředil na svary nicrosilu (růžový drát). V prvním experimentu bylo svařeno 12 různých skupin s různými parametry. Byly měněny parametry energie, směru svařování, velikost matrixu a rozložení matrixu. Na základě vizuální kontroly a tahové zkoušky byly určeny nejvhodnější parametry. U druhého experimentu bylo svařeno 5 skupin po 10 vzorcích. Parametry pro všechny skupiny byly stejné. Jediné, co se měnilo byla kontaminace svarových ploch. U svařených vzorků byla provedena vizuální kontrola a tahová zkouška. U vzorků, které praskly u tahové zkoušky ve svaru byla kontrolována i lomová plocha z důvodu kontroly, jestli se neobjevil křehký lom. Ten se neprojevil u žádného vzorku. Nakonec byla provedena ještě zkouška mikrotvrdosti. Pro každou skupinu se testovaly 2 vzorky. Ze všech těchto kontrol a testů bylo určeno, jak velký má kontaminace vliv.

U prvního experimentu vyšlo, že nejlepší parametry pro nicrosil má 3. a 4. skupina o hodnotě energie 1.665 J a velikosti matrixu 6x6 s rozložením 3TC/3cabel. Jediný rozdíl v parametrech u těchto skupin byl směr svařování, který neměl na kvalitu svaru vliv. Výsledky druhého experimentu prokázaly negativní vliv kontaminace na kvalitu svaru. Nejhuře dopadly vzorky kontaminované uhlíkem. Přestože všechny vzorky splnily požadované podmínky, je třeba se vyvarovat jakékoliv kontaminace.

Seznam literatury

- [1] SŠ-COPT Kroměříž: *Historie Svařování* [online]. In: . [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=19306&instance=2>
- [2] LAHIRI, Avijit. *Basic Optics - Principles and Concepts*. Elsevier, 2016. ISBN 978-0-12-805357-7.
- [3] MESSLER, Robert. *Principles of Welding - Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. John Wiley, 2004. ISBN 978-0-471-25376-1.
- [4] WEMAN, Klas. *Welding Processes Handbook*. 2nd ed. Woodhead Publishing, 2012. ISBN 978-0-85709-510-7.
- [5] O'BRIEN, Annette. *Welding Handbook: Welding Processes, Part 2*. 9th ed. American Welding Society (AWS), 2007. ISBN 978-0-87171-053-6.
- [6] *Nekonvenční metody obrábění – 4. díl* [online]. In: . [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonnecní-metody-obrabení-4-díl.html>
- [7] ROUBÍČEK, Martin. *Konstrukce: Laserové svařování - ekonomika a kvalita* [online]. In: . 26.12.2008 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/laserove-svarovani-ekonomika-a-kvalita/>
- [8] KOŘÁN, Pavel. *Lasery a optika: Laserové svařování I* [online]. In: . 18.2.2013 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
- [9] ZHOU, Y. *Microjoining and Nanojoining*. Woodhead Publishing, 2008. ISBN 978-1-84569-179-0.
- [10] LINNERT, George. *Welding Metallurgy: Carbon and Alloy Steels, Volume I - Fundamentals*. 4th ed. American Welding Society (AWS), 1994. ISBN 978-0-87171-457-2.
- [11] ELMER, J., P. HOCHANADEL, K. LACHENBERG a T. WEBBER. *Welding Handbook*. Ed. 11. American Society for Welding Metals, 2009.
- [12] CAMPBELL, F.C. *Joining - Understanding the Basics*. ASM International, 2011. ISBN 978-1-61503-825-1.
- [13] KOLAŘÍK, Ladislav. *Elektronové svařování* [online]. 2016 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/elektronove-svarovani-perspektivni-metoda-pro-specialni-materialy.html>
- [14] *Recommended Practices for Electron Beam Welding and Allied Processes*. American Welding Society (AWS), 2013. ISBN 978-0-87171-835-8.
- [15] HARRIS, Michael. *Welding Health and Safety - A Field Guide for OEHS Professionals*. American Industrial Hygiene Association (AIHA), 2012. ISBN 978-1-931504-28-7.
- [16] In: *Sciaky* [online]. [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: <http://www.sciaky.com/eb-welding-systems/large-chamber-systems>

- [17] YODER, Jesse a Dick MORLEY. *Tao of Measurement: A Philosophical View of Flow and Sensors*. ISA, 2015. ISBN 978-0-876640-91-3.
- [18] Ferrotec [online]. In: . [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref01/>
- [19] LAURILA, Heikki. *Thermocouple Cold (Reference) Junction Compensation* [online]. In: . 19.9. 2017 [cit. 2019-01-27]. Dostupné z: <https://blog.beamex.com/thermocouple-cold-junction-compensation>
- [20] CORNELL, Chuck. *Control Systems Engineer Technical Reference Handbook*. ISA, 2012. ISBN 978-1-937560-47-8.
- [21] Hashemian, H.M. *Sensor Performance and Reliability*. ISA, 2005. ISBN 978-1-55617-897-9.
- [22] GOETTSCHE, Lawrence D. *Maintenance of Instruments and Systems*. 2nd. ISA, 2005.
- [23] Ardatech: *Princip měření teploty termočlánkem* [online]. In: . [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: http://www.ardatech.cz/technicke_informace/
- [24] Kanthal: *Nicrosil-Thermocouple wire* [online]. In: . 19.1.2017 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://www.kanthal.com/en/products/material-datasheets/wire/thermocouple-wire/nicrosil/>
- [25] Isabellenhutte: *Nicrosil* [online]. In: . [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: https://www.isabellenhuetten.de/fileadmin/Daten/Praezisionslegierungen/Datenblaetter_Thermo/Englisch/NICROSIL.pdf
- [26] Isabellenhutte: *Nisil* [online]. In: . [cit. 2019-01-28]. Dostupné z: https://www.isabellenhuetten.de/fileadmin/Daten/Praezisionslegierungen/Datenblaetter_Thermo/Englisch/NICROSIL.pdf
- [27] Kanthal: *Nisil-Thermocouple wire* [online]. In: . 19.1.2017 [cit. 2019-01-28]. Dostupné z: <https://www.kanthal.com/en/products/material-datasheets/wire/thermocouple-wire/nisil/>

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Vladislavu Ochodkovi za rady a cenné připomínky při řešení této práce.

Dále by chtěl poděkovat společnosti Continental Automotive Czech Republic s.r.o. a jejich zaměstnancům za možnost zpracování této bakalářské práce.